

Avance en el diagnóstico del aislamiento en
Transformadores de Potencia basado en técnicas RVM
(Recovery Voltage Measurements)

Miguel Martínez Ronderos

Tesis depositada en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado
de Doctor en

Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática

Universidad Carlos III de Madrid

Director:

Jorge Pleite Guerra

Tutor:

Jorge Pleite Guerra

Julio 2020

Esta tesis se distribuye bajo licencia “Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**”.



A mi familia

El placer más noble es el júbilo de comprender.
Leonardo da Vinci

AGRADECIMIENTOS

Cuando ya se ve el final del camino allá a lo lejos, es el momento de detenerse un momento, reflexionar y hacer balance, de pensar en todas aquellas personas que han contribuido a hacer el viaje posible.

Antes de dar las gracias, es preciso pedir disculpas, a aquellas personas que, pese a ser los más importantes para mí son los que más alto precio han pagado, a mi mujer Laura que ha compartido los sinsabores del camino y sufrido mis ausencias y pese a todo ha sido una cómplice fundamental que ha hecho ímprobos esfuerzos para que este proyecto llegue a término, mil gracias son pocas. Así como a mis hijos Dani y Helena a los que les he robado tiempo de estar con ellos, muchas gracias por el sacrificio que habéis tenido que hacer y por estar ahí animando y dando apoyo.

A mis padres que son apoyo fundamental, siempre están ahí dispuestos a colaborar en lo que haga falta, desde pequeñito me habéis guiado y hecho crecer, redirigiendo el camino cuando se torcía, fundamentales han sido esas excursiones con cinco o seis años donde frente a la STR Prado Pozuelo mi padre se esmeraba en explicarme la diferencia entre una estrella y un triángulo.

Mi hermano es otro incondicional, aunque él no lo sabe, en otra vida debió ser tercera línea siempre está ahí en apoyo, si algo se complica siempre se puede contar con él.

Para la Universidad tampoco faltan elogios, he tenido grandes profesores, esos que no solo te enseñan la materia, especial cariño le tengo a Juan Carlos Burgos quien cuando no éramos suficientes para formar grupo para dar una asignatura optativa la impartió aun cuando no se la iban a reconocer y con quien he tenido charlas técnicas geniales, a Juan Carlos Rodríguez Amenedo y su “chicos prestad atención, algún día este puede ser vuestro caballo de batalla”, pues sí, al final lo ha sido, o a Ulpiano Ruiz, que nos hizo sudar para aprobar pero las explicaciones eran geniales. Como no puede ser de otra manera no puede faltar Jorge, la verdad es que ya habíamos hecho otros trabajos antes de la tesis y siempre ha sido un gran guía, gracias por tus mil enfoques, por las cuestiones, por querer llegar al último extremo, tu impronta no solo ha quedado plasmada en esta tesis, yo también me llevo parte.

Carlos Gonzalez por su parte también ha contribuido, ha sido un guía imprescindible, desde su experiencia con su tesis ha sabido darme sabios consejos, y algún empujón clave para sacar esto a delante.

Por último, un grupo de personas, todos ellos englobados en el epígrafe compañeros de Iberdrola, pero no son solo compañeros, son grandes amigos y grandes personas han sido todos muy importantes, Hugo, Carlos, Manolo, Emilio, Juan, Julián, Pilar, Candi, Laura (sí, con Laura hubo química o magnetismo no lo tenemos claro), desde que llegué al laboratorio todos me acogieron y se brindaron a enseñarme explicarme. Mis primeros ensayos eléctricos los hice con Manolo Llorente en AT5 de Gatika lo recuerdo como si fuera ayer, Carlos con sus vueltas al final encontrábamos la solución, la sabiduría de Juan y sus consejos y Julián, el incrédulo, siempre consigue que tengas que prepararte las explicaciones al detalle para que se dé por satisfecho, Pilar y Candi me enseñaron los secretos del aceite y Laura a la que no se le escapaba un detalle haciendo los diagnósticos. Especial mención he de hacer a Emilio Sierra Gómez, quien puso todo de su parte de una manera desinteresada para enseñarme lo muchísimo que sabe, y trasladarme años de experiencia, suya es la culpa de esta Tesis y como mínimo ha de atribuírsele el 50% de la autoría, ya que fue quien me enseñó a interpretar la reabsorción, a diagnosticar transformadores y con quien he disfrutado muchísimo trabajando, ha sido mi maestro y mentor.

Hay otro grupo de personas que también son compañeros de Iberdrola con los que he pasado muchísimas horas, haciendo ensayos, buscando averías, haciendo reparaciones (o milagros algunas veces), profesionales de una categoría superior con un grado de implicación altísimo y además grandísimas personas, como buenos compañeros me han ayudado en todo lo que han podido y he aprendido muchísimo de ellos, Baeza, Pepe (las liebres), Luis, Antonio Serrano, Antonio Guedes, José, Alejandro, Damián, Quico, Juan Carlos Muñoz, “Juanqui”, Juan Carlos Martínez, Manolo, Marco, Juanan, Roberto, Jesús, Manolo Delgado, Roldán, Marce y Guillermo cuanto frío, cuanto calor y cuantos buenos momentos de compañerismo.

Va a ser verdad que para educar a un niño ha hecho falta una tribu entera, una
EXCELENTE tribu entera.

CONTENIDOS PUBLICADOS Y PRESENTADOS

Miguel Martínez, Carlos Vila, Diego Lumbreras, Laura Hernández, Emilio Sierra, “Risk of contamination of the oil during the different processes after testing a new transformer. Detection and Analysis of this contamination and description of the process to remove it successfully.” en 5th International Advanced Research Workshop on Transformers (ARWtr), La Toja (2016)

Este elemento está parcialmente incluido en la tesis en el capítulo 2. El material de esta fuente incluido en la tesis no está señalado por medios tipográficos ni referencias.

Miguel Martínez, Jorge Pleite, “Improvement of RVM Test Interpretation Using a Debye Equivalent Circuit” en 6th International Advanced Research Workshop on Transformers (ARWtr), Córdoba (2019) y trasladado al Xplorer de IEEE.

Este elemento está parcialmente incluido en la tesis en los capítulos 5 y 6. El material de esta fuente incluido en la tesis no está señalado por medios tipográficos ni referencias.

Miguel Martínez, Jorge Pleite, “Improvement of RVM Test Interpretation Using a Debye Equivalent Circuit” (Versión extendida), *Energies*. 2020; 13(2):323 Revista JCR Q2 factor de impacto 2,707 <https://doi.org/10.3390/en13020323>

Este elemento está parcialmente incluido en la tesis en el en los capítulos 5 y 6. El material de esta fuente incluido en la tesis no está señalado por medios tipográficos ni referencias.

Cigré Study Committee A2 WG A2.43, Miguel Martínez, “Transformer bushing reliability” publicado como Technical Brochures 755, y como artículo en *Electra* (Elt_303_3) París, (2019)

Este elemento está parcialmente incluido en la tesis en el capítulo 2. El material de esta fuente incluido en la tesis no está señalado por medios tipográficos ni referencias.

OTROS MÉRITOS DE INVESTIGACIÓN

Miguel Martínez, Hugo Gago, Emilio Palazuelos “Use of Dissipation Factor (Tan Delta) Tests Within the Range of 15-400 Hz to Characterize the Condition of Transformer's Bushing” en 4th International Advanced Research Workshop on Transformers, Baiona (2013)

Miguel Martínez, Carlos Vila, Miguel Cuesto, Miguel Vaquero, J. Enrique Grijuela “Comparison between different methods to measure winding hot-spots” artículo A2-109 presentado en la session plenaria de Cigré, Paris (2018)

Contenido

1	Definición del problema	1
1.1	Casística actual	1
1.2	Propuesta de solución	2
2	Estado del arte	5
2.1	El transformador	5
2.1.1	El circuito dieléctrico del transformador	7
2.1.2	Envejecimiento del aislamiento papel-aceite.....	12
2.2	Procesos de mejora de la condición del fluido dieléctrico de los transformadores aplicables en campo.	16
2.2.1	Tratamientos de reacondicionado y secado	18
2.2.2	Tratamientos de regeneración del aceite.....	19
2.3	Métodos de diagnóstico de la condición del circuito dieléctrico.....	21
2.3.1	Análisis químicos del dieléctrico.	21
2.3.2	Métodos eléctricos para determinar la condición del aislamiento.	26
3	La Tensión de reabsorción	31
3.1.1	Descripción.....	31
3.1.2	Debilidades.....	35
4	Base teórica (Física de dieléctricos).....	39
4.1	Polarización de la materia:	39
4.1.1	Concepto de dipolo y múltiplo.....	39
4.2	Mecanismos de polarización de la materia.....	39
4.2.2	Polarización inducida (electrónica e iónica)	42
4.2.3	Polarización orientacional.....	46
4.2.4	Relación entre la polarizabilidad y la constante dieléctrica	48
4.3	Dieléctricos en campos variables con el tiempo.	50
4.3.1	Función de respuesta dieléctrica	51
4.3.2	Relajaciones bipolares.	56
5	El circuito equivalente.....	59
5.1	La base del circuito	59
5.1.1	Circuito deducido (Circuito extendido de Debye).	60
5.1.2	Componentes de las ramas de polarización	61
5.1.3	Circuito equivalente del Modelo Extendido de Debye	62
5.2	Influencia de los componentes	63
5.2.1	Dependencia de R	63
5.2.2	Dependencia de C	64

5.2.3	Dependencia de C_i y R_i	66
5.2.4	Relación entre tiempo de carga y descarga k	70
5.3	Compensación de temperatura de las mediciones dieléctricas	71
5.3.1	Compensación de temperatura para medidas en el dominio de la frecuencia (FDS)	71
5.3.2	Interpretación física de la corrección de temperatura	72
5.3.3	Ejemplo corrección por temperatura	74
5.3.4	Aplicabilidad de la corrección por temperatura	78
6	Algoritmo	81
6.1	Descripción del algoritmo	81
6.1.1	Obtención de C_g	82
6.1.2	Obtención de R_g	83
6.1.3	Obtención de C_n y R_n	85
6.2	(Validación del algoritmo) Test con otros métodos planteados en otros artículos	88
6.2.1	Comparativa con los valores del artículo: Modeling of Polarization in Oil-Paper Insulation Using Recovery Voltage Measurements [33]	89
6.2.2	Comparativa con los valores del artículo: Modelling and Calculation for Dielectric Response Circuit of Oil-Paper Insulation Transformers [29]	90
6.2.3	Comparativa con los valores del artículo: Deriving an Equivalent Circuit of Transformers Insulation for Understanding the Dielectric Response Measurements [39]	91
6.2.4	Conclusión de la validación	93
7	Ensayos realizados	95
7.1	Ensayos realizados	96
7.1.1	Ensayos eléctricos	96
7.1.2	Ensayos fisicoquímicos del aceite	102
7.2	Resultados obtenidos	104
7.3	Equipos de prueba empleados	106
7.4	Representación de los resultados	108
7.4.1	Transformador 1 ensayo 1	110
7.4.2	Transformador 2 ensayo 1	112
7.4.3	Transformador 3 ensayo 1	114
7.4.4	Transformador 3 ensayo 2	117
7.4.5	Transformador 4 ensayo 1	120
7.4.6	Transformador 4 ensayo 2	123
7.4.7	Transformador 5 ensayo 1	126

7.4.8	Transformador 6 ensayo 1.....	129
7.4.9	Transformador 6 ensayo 2.....	132
7.4.10	Transformador 7 ensayo 1.....	135
7.4.11	Transformador 8 ensayo 1.....	138
7.4.12	Transformador 8 ensayo 2.....	141
7.4.13	Transformador 8 ensayo 3.....	145
7.4.14	Transformador 8 ensayo 4.....	148
7.4.15	Transformador 9 ensayo 1.....	150
7.4.16	Transformador 10 ensayo 1.....	153
7.4.17	Transformador 10 ensayo 2.....	156
7.4.18	Transformador 11 ensayo 1.....	159
7.4.19	Transformador 12 ensayo 1.....	162
7.4.20	Transformador 12 ensayo 2.....	165
7.4.21	Transformador 13 ensayo 1.....	167
7.4.22	Transformador 14 ensayo 1.....	170
7.4.23	Transformador 15 ensayo 1.....	173
7.4.24	Transformador 16 ensayo 1.....	176
7.4.25	Transformador 16 ensayo 2.....	179
7.4.26	Transformador 17 ensayo 1.....	181
7.4.27	Transformador 18 ensayo 1.....	184
7.4.28	Transformador 19 ensayo 1.....	187
7.4.29	Transformador 20 ensayo 1.....	190
7.4.30	Transformador 21 ensayo 1.....	193
7.4.31	Transformador 22 ensayo 1.....	196
7.5	Análisis en conjunto	199
7.5.1	Transformadores envejecidos.....	200
7.5.2	Transformadores sometidos a un proceso de reacondicionado	201
7.5.3	Transformadores sometidos a un proceso de secado de parte activa.....	202
7.5.4	Transformadores con polarización interfacial sometidos a un proceso de regeneración.	203
7.5.5	Transformadores sin polarización interfacial sometidos a un proceso de regeneración.	204
7.5.6	Análisis de la superposición de respuestas en base al tratamiento	206
7.5.7	Áreas de influencia.....	209
8	Conclusiones	213
8.1	Conclusiones generales	213

8.2	Contribuciones principales	213
8.3	Trabajos subsiguientes a esta tesis	214
9	Software	217
9.1	Mapa del software (Programa y subprogramas)	217
9.2	Ajuste_RVM_Oct	217
9.3	Subprogramas nivel 1.....	220
9.3.1	Resistencia_Oct.....	220
9.3.2	RVM_1P_Ajuste	220
9.3.3	RVM_Completa	222
9.4	Subprogramas nivel 2.....	224
9.4.1	Simular.m	224
9.4.2	SimularXIV	226
10	Bibliografía	235

Listado de figuras:

Figura 1 Diagrama de flujo desarrollo de la solución propuesta	3
Figura 2 Fallos en transformadores, fallos y tipos [6].....	6
Figura 3 Cortocircuito provocado por colapso mecánico del papel aislante [Archivo personal]	6
Figura 4 Constante dieléctrica de papel Kraft frente a papeles térmicamente mejorados NOMEX. Fuente DUPONT	8
Figura 5 Polímeros enlazados (β -glucosas) que forman las fibras de papel.....	8
Figura 6 Fibras de papel nuevo [10]	10
Figura 7 Fibras de papel sometidas a una temperatura de 160°C [10].....	10
Figura 8 Representación de una molécula de aceite mineral dieléctrico, compuesto por hidrocarburos parafínicos, nafténicos y aromáticos. Fuente NYNAS NAPHTHENICS..	11
Figura 9 Proceso de oxidación del aceite, evolución de los productos de descomposición [13]	13
Figura 10 Evolución del grado de despolimerización (DP) y del furfural (2FAL) durante el envejecimiento del papel [14].....	14
Figura 11 Ejemplo de depósito de lodos sobre el yugo de un transformador [Archivo personal]	15
Figura 12 Esquema de los distintas tasas de envejecimiento en función de los mecanismos de envejecimiento, la flecha indica el efecto del aumento de la humedad en los factores A [13]	16
Figura 13 Evolución de la presión soportada por las probetas de prueba en función del grado de humedad [16]	18
Figura 14 Montaje de probeta de prueba para verificar el cambio de presión en función de la humedad (model 2) [16].....	18
Figura 15 Equipo de filtrado de aceite móvil saliendo de los talleres de Micafil sobre 1930 [16]	18
Figura 16 Esquema de configuración de equipo de regeneración [16]	20
Figura 17 Aspecto del aceite dieléctrico en función del grado de contaminación que presenta. Fuente NYNAS NAPHTHENICS	21
Figura 18 Dependencia de la tensión de ruptura dieléctrica con la temperatura y la humedad [21].....	23
Figura 19 Distribución de temperatura, humedad y envejecimiento en función de la cota dentro de un transformador [22]	24
Figura 20 Distribución del agua entre el papel y el aceite en función de la temperatura del transformador [22]	24
Figura 21 Evolución del grado de acidez en función de si el aceite es no inhibido o inhibido [21]	25
Figura 22 Diagrama fasorial corrientes circulante por un dieléctrico real [23]	25
Figura 23 Circuito equivalente de un aislamiento compuesto por un condensador en paralelo con una resistencia de fuga [23]	25
Figura 24 Corrientes medidas durante el ensayo [24].....	27
Figura 25 Diagrama esquemático del setup de un ensayo PDC [25]	27
Figura 26 Efecto de la humedad en la corriente de polarización [26]	27
Figura 27 Variación de la corriente de despolarización en función de la conductividad [26] .	27

Figura 28 Setup para la media en dos canales, en este caso se obtendrá la respuesta dieléctrica del aislamiento entre AT y BT y entre AT y Terciario [Captura pantalla software Dirana 1.1 (OMICRON)].....	28
Figura 29 Sensibilidad a las variaciones en la condición del aislamiento. [27]	28
Figura 30 Zonas de influencia de los distintos efectos sobre el aislamiento. [27]	29
Figura 31 Diagrama de flujo de información para la obtención del valor de contenido en humedad del transformador [27]	29
Figura 32 Durante la medida de RVM el dieléctrico es cargado con una tensión continua de valor U_0 para un tiempo t $0 \leq t \leq t_1$, es cortocircuitado y aterrizado para un tiempo $t_1 \leq t \leq t_2$, y para $t > t_2$ es medida la tensión de reabsorción en condiciones de circuito abierto [25].....	31
Figura 33 Circuito equivalente del circuito dieléctrico de un transformador (modelo extendido de Debye). [30]	32
Figura 34 Evolución de la tensión en los condensadores del circuito equivalente y tensión en bornes del equipo de medida tras un tiempo de carga de 6,4 segundos.	33
Figura 35 Evolución de la tensión en los condensadores del circuito equivalente y tensión en bornes del equipo de medida tras un tiempo de carga de 51,2 segundos.	34
Figura 36 Evolución de la tensión en los condensadores del circuito equivalente y tensión en bornes del equipo de medida tras un tiempo de carga de 819,2 segundos.	34
Figura 37 TP nuevo [Archivo personal]	35
Figura 38 TP con sustancias polares presentes [Archivo personal]	35
Figura 39 TP al final de su vida [Archivo personal]	35
Figura 40 Ejemplo de respuesta RVM de un transformador cargado electrostáticamente. [Archivo personal]	36
Figura 41 Apantallamiento del campo eléctrico en el interior de un conductor [33]	40
Figura 42 Apantallamiento parcial del campo en el interior de un material dieléctrico. E_0 representa el campo sin dieléctrico y E es el campo resultante después de introducir el dieléctrico. [32].....	41
Figura 43 Modelo de polarización electrónica para átomos esféricos [32].....	43
Figura 44 Modelo de polarización iónica de una molécula diatómica. [32]	44
Figura 45 a) Estructura de una molécula de agua, b) Cambio de ángulo del enlace al aplicar un campo [32].....	45
Figura 46 Modelo de polarización iónica en una red cúbica [32]	46
Figura 47 Polarización orientacional	47
Figura 48 Estructura del polímero de silicona utilizado en bornas RIP [HSP Hochspannungsgeräte GmbH]	47
Figura 49 Curva de polarización obtenida durante un ensayo de resistencia de aislamiento. [archivo personal]	48
Figura 50 Respuesta ante un pulso siguiendo una señal cualquiera [32].....	52
Figura 51 Representación del ángulo δ en función de los vectores E y D [32]	53
Figura 52 Representación esquemática de las curvas de dispersión (permitividad dieléctrica), es importante observar las zonas, y las contribuciones, polarización interfacial I , de dipolo P , atómica A y electrónica E	55
Figura 53 Variación con la frecuencia de ϵ' y ϵ'' [32].....	57
Figura 54 Diagrama esquemático de un sistema polarizado. [30].....	60
Figura 55 diseño esquemático de un aislamiento papel aceite [34]	61
Figura 56 Estructura de aislamiento en un transformador [35]	61

Figura 57 Diagrama que modela un dieléctrico con un solo tiempo de relajación. [30]	62
Figura 58 Circuito equivalente del circuito dieléctrico de un transformador (modelo extendido de Debye). [39]	63
Figura 59 Representación de la sensibilidad en la respuesta ante la variación de R_g	64
Figura 60 Representación de la sensibilidad en la respuesta ante la variación de C_g	65
Figura 61 Dependencia del espectro de RVM de los valores C_i y R_i para las constantes de tiempo bajas	67
Figura 62 Dependencia del espectro de RVM de los valores C_i y R_i para las constantes de tiempo altas	68
Figura 63 Dependencia del espectro de RVM de los valores C_i y R_i para las constantes de tiempo medias.	69
Figura 64 Evolución del ratio τ_{cd}/τ_p dependiendo del valor de k	71
Figura 65 Medida de respuesta de perdidas dieléctricas en el dominio de la frecuencia (FDS) de un mismo espécimen variando la temperatura (a) temperatura de referencia, (b) 50°C y (c) 75°C. [41].....	72
Figura 66 Aplicación de la ecuación de Arrhenius para el cálculo del coeficiente α_T [41].....	73
Figura 67 Representación de respuesta RVM de un TP nuevo a dos temperaturas distintas. 75	
Figura 68 Representación de las "correspondencias" entre puntos de la respuesta RVM de un mismo TP medidas a 14 y 35°C	76
Figura 69 Superposición tras desplazar dos periodos de medida la curva de RVM a 35°C para observar la correlación con la curva medida a 14°C.....	77
Figura 70 Circuito extendido de Debye	81
Figura 71 Configuración ensayo RVM sobre un TP de dos devanados	83
Figura 72 Esquema simplificado de capacidades encontradas en el ensayo RVM para un TP de dos devanados	83
Figura 73 Representación valor ajustado respecto a valor medido de resistencia de aislamiento	84
Figura 74 Variación de capacidad en función de R_g : R_g estimada= 5,04e13 R_g ajustada 1,26e13	84
Figura 75 TR reabsorción ajustada a partir de una sola rama para ajustar únicamente al valor de tensión del punto correspondiente del ensayo RVM.....	86
Figura 76 Resultado de simular las 14 C_n calculadas de manera conjunta frente a la curva obtenida en el ensayo RVM real	86
Figura 77 Diagrama de flujo algoritmo de ajuste de curvas RVM.....	87
Figura 78 Evolución de la RVM simulada hasta que converge con la RVM objetivo (solo se han representado las iteraciones pares para facilitar la lectura del gráfico).....	87
Figura 79 Detalle puntos del 8 al 14.....	88
Figura 80 Detalle puntos del 1 al 7.....	88
Figura 81 Representación de la figura 5 extraída del artículo citado [34], en la que se muestran los valores de todos los componentes del circuito equivalente empleados para simular la respuesta RVM.....	89
Figura 82 Resultado de la medida y la simulación en base a los parámetros calculados del espectro de polarización del ensayo presentado en el artículo citado [34]	89
Figura 83 Representación de la respuesta RVM empleando los parámetros del circuito equivalente presentado en la Figura 81, puede observarse cómo el resultado se ajusta al resultado obtenido por los autores en [34], y presentado en la Figura 82.....	89

Figura 84 Tabla con los valores de los componentes del circuito equivalente empleado por los autores y presentado en el artículo [30]	90
Figura 85 Figura que ilustra el artículo y representa el espectro de polarización obtenido en base a los parámetros indicados por los autores [30]	90
Figura 86 Espectro obtenido con los parámetros empleados en el artículo citado [30] empleando el algoritmo desarrollado para este trabajo.	90
Figura 87 Tabla con los valores de los componentes del circuito equivalente empleado por los autores y presentado en el artículo [40]	91
Figura 88 Figura que ilustra el artículo y representa los espectros de polarización obtenido en base a los parámetros indicados por los autores [40]	91
Figura 89 Espectro obtenido con los parámetros empleados en el artículo citado.	91
Figura 90 Superposición y diferencia de las curvas publicadas empleando 6 o 4 ramas.	93
Figura 91 Diagrama de flujo seguido para la evaluación del circuito dieléctrico, valoración de la necesidad de actuación sobre el aceite y/o la parte activa y evaluación de los resultados.	95
Figura 92 Esquema de capacidades de un transformador de dos devanados configurado para hacer el ensayo de tensión de reabsorción inyectando por alta tensión.	97
Figura 93 Circuito equivalente que deriva de la imagen contigua.	97
Figura 94 Modo de test GST [23]	98
Figura 95 Modo de test GST-Guard [23]	99
Figura 96 Modo de prueba UST [23]	99
Figura 97 Capacidades en un transformador de 3 devanados [23]	100
Figura 98 Ejemplo de cortocircuitado y conexionado para TP de dos devanados, atención a la puesta a tierra del electrodo de referencia [29]	102
Figura 99 Figura 7a de la norma IEC60475:2011 "Example of sampling by bottle"	103
Figura 100 Panel de mando tipo para todos los ensayos, y sus distintos contenidos.	109
Figura 101 RVM trafo 1 prueba 1	110
Figura 102 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	110
Figura 103 Cuadro resumen, Tp1 ensayo 1.....	111
Figura 104 RVM trafo 2 prueba 1	112
Figura 105 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	112
Figura 106 Cuadro resumen, Tp2 ensayo 1.....	113
Figura 107 RVM trafo 3 prueba 1	114
Figura 108 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	115
Figura 109 Cuadro resumen, Tp3 ensayo 1.....	116
Figura 110 Cuadro resumen, Tp3 ensayo 2.....	119
Figura 111 RVM trafo 4 prueba 1	120
Figura 112 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	121
Figura 113 Cuadro resumen, Tp4 ensayo 1.....	122
Figura 114 RVM trafo 4 prueba 1	123
Figura 115 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	124
Figura 116 Cuadro resumen, Tp4 ensayo 2.....	125
Figura 117 RVM trafo 5 prueba 1	126
Figura 118 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	127
Figura 119 Cuadro resumen, Tp5 ensayo 1.....	128
Figura 120 RVM trafo 6 prueba 1	129
Figura 121 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	130

Figura 122 Cuadro resumen, Tp6 ensayo 1.....	131
Figura 123 RVM trafo 6 prueba 2.....	132
Figura 124 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	133
Figura 125 Cuadro resumen, Tp6 ensayo 2.....	134
Figura 126 RVM trafo 7 prueba 1.....	135
Figura 127 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	136
Figura 128 Cuadro resumen, Tp7 ensayo 1.....	137
Figura 129 RVM trafo 8 prueba 1.....	139
Figura 130 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	139
Figura 131 Cuadro resumen, Tp8 ensayo 1.....	140
Figura 132 RVM trafo 8 prueba 2.....	141
Figura 133 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	142
Figura 134 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente antes del tratamiento y posterior al tratamiento.	143
Figura 135 Cuadro resumen, Tp8 ensayo 2.....	144
Figura 136 RVM trafo 8 prueba 3.....	145
Figura 137 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	146
Figura 138 Cuadro resumen, Tp8 ensayo 3.....	147
Figura 139 RVM trafo 8 prueba 4.....	148
Figura 140 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	148
Figura 141 Cuadro resumen, Tp8 ensayo 4.....	149
Figura 142 RVM trafo 9 prueba 1.....	150
Figura 143 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	151
Figura 144 Cuadro resumen, Tp9 ensayo 1.....	152
Figura 145 RVM trafo 10 prueba 1.....	153
Figura 146 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	154
Figura 147 Cuadro resumen, Tp10 ensayo 1.....	155
Figura 148 RVM trafo 10 prueba 2.....	156
Figura 149 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	157
Figura 150 Cuadro resumen, Tp10 ensayo 2.....	158
Figura 151 RVM trafo 11 prueba 1.....	159
Figura 152 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	160
Figura 153 Cuadro resumen, Tp11 ensayo 1.....	161
Figura 154 RVM trafo 12 prueba 1.....	162
Figura 155 valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	163
Figura 156 Cuadro resumen, Tp12 ensayo 1.....	164
Figura 157 RVM trafo 12 prueba 2.....	165
Figura 158 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	165
Figura 159 Cuadro resumen, Tp12 ensayo 2.....	166
Figura 160 RVM trafo 13 prueba 1.....	167
Figura 161 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	168
Figura 162 Cuadro resumen, Tp13 ensayo 1.....	169
Figura 163 RVM trafo 14 prueba 1.....	170
Figura 164 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	171
Figura 165 Cuadro resumen, Tp14 ensayo 1.....	172
Figura 166 trafo 15 prueba 1.....	173
Figura 167 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	174

Figura 168 Cuadro resumen, Tp15 ensayo 1.....	175
Figura 169 RVM trafo 16 prueba 1.....	176
Figura 170 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	177
Figura 171 Cuadro resumen, Tp2 ensayo 2.....	178
Figura 172 RBM trafo 16 prueba 2.....	179
Figura 173 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	179
Figura 174 Cuadro resumen, Tp16 ensayo 2.....	180
Figura 175 RVM trafo 17 prueba 1.....	181
Figura 176 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	182
Figura 177 Cuadro resumen, Tp17 ensayo 1.....	183
Figura 178 RVM trafo 18 prueba 1.....	184
Figura 179 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	185
Figura 180 Cuadro resumen, Tp18 ensayo 1.....	186
Figura 181 RVM trafo 19 prueba 1.....	187
Figura 182 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	188
Figura 183 Cuadro resumen, Tp18 ensayo 2.....	189
Figura 184 RVM trafo 20 prueba 1.....	190
Figura 185 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente	191
Figura 186 Cuadro resumen, Tp20 ensayo 1.....	192
Figura 187 RVM trafo 21 prueba 1.....	193
Figura 188 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente.	194
Figura 189 Cuadro resumen, Tp21 ensayo 1.....	195
Figura 190 RVM trafo 22 prueba 1.....	196
Figura 191 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente.	197
Figura 192 Cuadro resumen, Tp22 ensayo 1.....	198
Figura 193 Representación de la capacidad C_n obtenida para el circuito equivalente de Debye del transformador 19 prueba 1.	199
Figura 194 \log_{10} de la relación entre la capacidad previa al tratamiento y la capacidad de cada rama posterior al tratamiento.....	199
Figura 195 Valores normalizados del valor obtenido en el logaritmo de la relación entre los valores previos y posteriores al tratamiento de C_n	199
Figura 196 Valores normalizados de la variación de capacidad en cada una de las ramas del circuito equivalente de Debye.....	200
Figura 197 Valores normalizados de la variación de capacidad en cada una de las ramas del circuito equivalente de Debye.....	201
Figura 198 Valores normalizados de la variación de capacidad en cada una de las ramas del circuito equivalente de Debye.....	202
Figura 199 Ejemplo de respuesta RVM de un transformador afectado por polarización interfacial (transformador 16 prueba 1)	203
Figura 200 Valores normalizados de la variación de capacidad en cada una de las ramas del circuito equivalente de Debye.....	204
Figura 201 Transformador 12_ prueba 1	205
Figura 202 Transformador 15 prueba 1	205
Figura 203 Transformador 9 prueba 1	205
Figura 204 Transformador 14 prueba 1	205
Figura 205 Valores normalizados de la variación de capacidad en cada una de las ramas del circuito equivalente de Debye.....	206

Figura 206 Variación normalizada de las distintas ramas del circuito equivalente en función del tipo de tratamiento. Representado por nº de rama.	206
Figura 207 Variación normalizada de las distintas ramas del circuito equivalente en función del tipo de tratamiento. Representado por tiempo de carga.....	207
Figura 208 Variación normalizada de las ramas tras tratamientos en los que se elimina la humedad.....	207
Figura 209 Variación normalizada de las ramas tras tratamientos de regeneración en aquellos transformadores en los que no se aprecia polarización interfacial como único efecto.	208
Figura 210 Variación normalizada de las ramas tras tratamientos de regeneración en aquellos transformadores en los que se aprecia polarización interfacial como único efecto.	208
Figura 211 Variación normalizada de las ramas a lo largo de un periodo prolongado de envejecimiento natural del transformador.	209
Figura 212 Representación de las distintas áreas de influencia en función del tratamiento realizado	210
Figura 213 Representación de las distintas áreas de influencia de los contaminante y dónde se encuentre en el transformador.	211

Lista de tablas

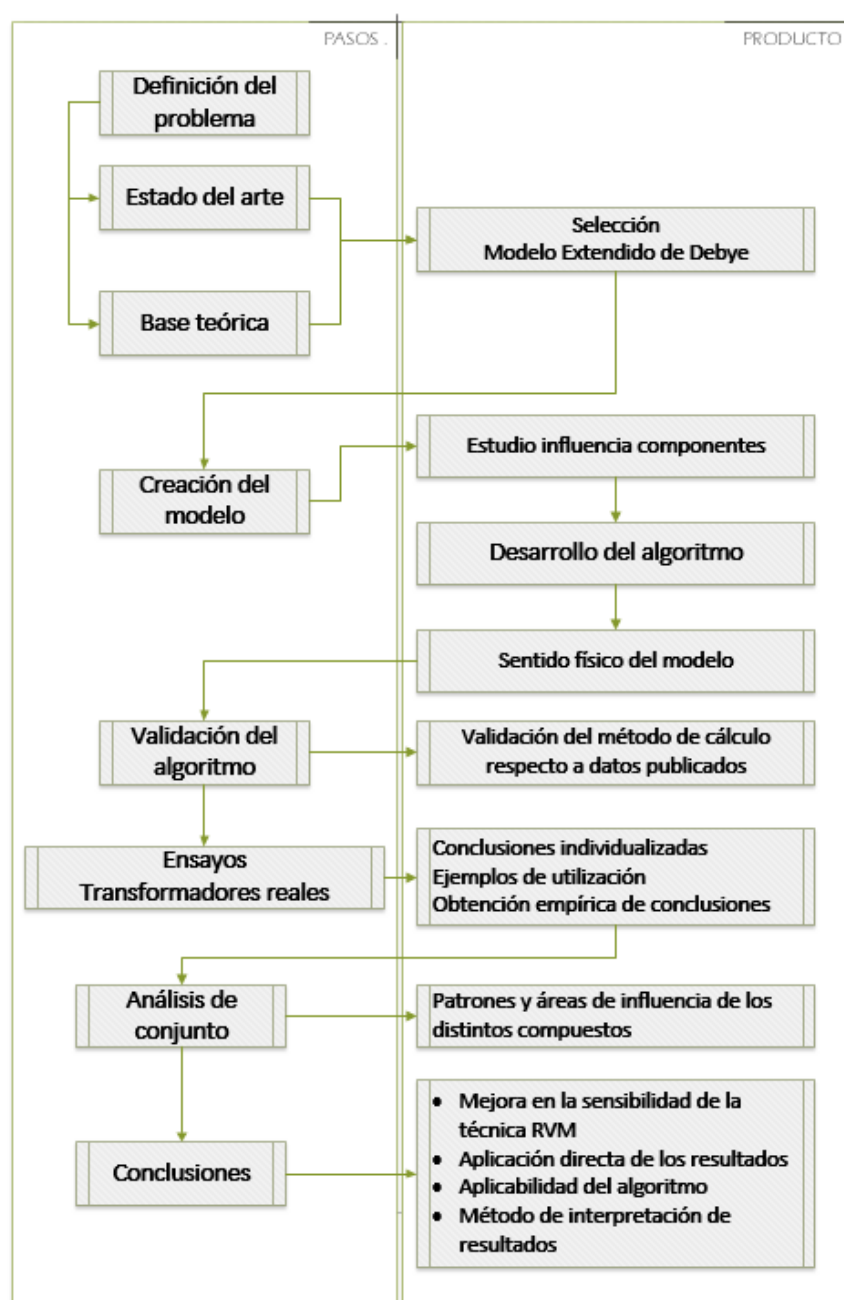
Tabla 1 Procesos interrelacionados de la degradación del papel-aceite.....	15
Tabla 2 Ensayos para aceites minerales de rutina y complementarios	22
Tabla 3 Parametros empleados para el ejemplo de tres ramas de 0,5, 40 y 500 segundos ...	32
Tabla 4 Posibles causas del aumento de pérdidas dieléctricas ajenas a una mala condición del aislamiento (fuentes de error)	35
Tabla 5 Polarizabilidad electrónica de algunos átomos o iones (expresada en 10^{-41} F.m ²)	44
Tabla 6 Constante dieléctrica relativa de sustancias típicas.....	49
Tabla 7 Parámetros empleados para el estudio de sensibilidad respecto a Rg.....	63
Tabla 8 Parámetros empleados para el estudio de sensibilidad respecto a Cg.....	65
Tabla 9 Parámetros empleados para el estudio de sensibilidad respecto a ramas de polarización compuestas de Cpi y Rpi con constante de tiempo bajas.....	66
Tabla 10 Parámetros empleados para el estudio de sensibilidad respecto a ramas de polarización compuestas de Cpi y Rpi con constante de tiempo altas.	68
Tabla 11 Parámetros empleados para el estudio de sensibilidad respecto a ramas de polarización compuestas de Cpi y Rpi con constante de tiempo medias.	69
Tabla 12 Calculo del valor para cada ciclo medido de α_{t35-14} después de trasladar la medida de RVM @ 35°C	77
Tabla 13 Valores de las ramas de un circuito equivalente para un aislamiento a 35º y para un aislamiento a 14 y cálculo del factor α_{t35-14}	78
Tabla 14 Valores obtenidos de resistencia de aislamiento, medido durante 10 minutos, valores registrados minuto a minuto.	83
Tabla 15 Tiempo de carga en empleado en cada ciclo.	85
Tabla 16 Parámetros empleados en sendos dos artículos para la misma curva.	92
Tabla 17 Distintos modos de prueba y sus conexiones para ser empleadas en transformadores de dos devanados.	100
Tabla 18 Distintos modos de prueba y sus conexiones para ser empleadas en autotransformadores transformadores con terciario.	100
Tabla 19 Distintos modos de prueba y sus conexiones para ser empleadas en transformadores de tres devanados.....	101
Tabla 20 Modos de conexión en función del tipo de transformador.	102
Tabla 21 Ensayos FQ aplicados y norma que les corresponde	103
Tabla 22 Listado de equipos ensayados y proceso llevado a cabo en cada uno de ellos.....	104
Tabla 23 Listado de transformadores ensayados y los equipos y configuraciones empleados para los ensayos.....	107
Tabla 24 Condición del aceite inicial y transcurridos 5 años	117
Tabla 25 Condición del aceite inicial y transcurridos 5 años	120
Tabla 26 Condición del aceite inicial y tras un proceso de regeneración y secado de parte activa.....	123
Tabla 27 Condición del aceite inicial y tras un proceso de regeneración.	126
Tabla 28 Valor obtenido de la resistencia de aislamiento [GOhm] medida minuto a minuto durante los ensayos realizados previos y posteriores al tratamiento	126
Tabla 29 Condición del aceite inicial y tras un proceso de secado.....	129
Tabla 30 Valor obtenido de la resistencia de aislamiento [GOhm] medida minuto a minuto durante los ensayos realizados previos y posteriores al tratamiento	129
Tabla 31 Condición del aceite tras reacondicionado y tras un proceso de secado.....	135
Tabla 32 Condición del aceite previo y posterior a un proceso de secado	138

Tabla 33 Resistencia de aislamiento en GOhm, antes y después del tratamiento	138
Tabla 34 Condición del aceite previo, posterior a un proceso de secado y transcurrido un año tras el tratamiento	141
Tabla 35 Valor de resistencia en GOhm tras el tratamiento de secado y transcurrido un año de este.	142
Tabla 36 Condición del aceite previo, posterior a un proceso de regeneración y reacondicionado	150
Tabla 37 Condición del aceite previo y posterior a un proceso de reacondicionado	153
Tabla 38 Condición del aceite previo y posterior a un proceso de regeneración	156
Tabla 39 Condición del aceite previo y posterior a un proceso de reacondicionado	159
Tabla 40 Evolución entre el minuto 1 y 10 de la resistencia de aislamiento antes y después del tratamiento expresado en GOhm.....	159
Tabla 41 Condición del aceite previo y posterior a un proceso de regeneración	162
Tabla 42 Evolución entre el minuto 1 y 10 de la resistencia de aislamiento antes y después del tratamiento expresado en GOhm.....	162
Tabla 43 Condición del aceite previo y posterior a un proceso de regeneración y reacondicionado	167
Tabla 44 Condición del aceite previo y posterior al cambio de aceite realizado.....	170
Tabla 45 Condición del aceite previo y posterior al cambio de aceite realizado.....	173
Tabla 46 Condición del aceite previo y posterior al tratamiento de regeneración realizado.	176
Tabla 47 Valores obtenidos tras la regeneración y transcurridos 8 años.....	181
Tabla 48 Condición del aceite previo y posterior al tratamiento de regeneración realizado.	184
Tabla 49 Condición del aceite previo y posterior al tratamiento de regeneración realizado.	187
Tabla 50 Condición del aceite previo y posterior al tratamiento de regeneración realizado.	190
Tabla 51 Condición del aceite previo y posterior al tratamiento de regeneración realizado.	193
Tabla 52 Condición del aceite previo y posterior al tratamiento de regeneración realizado.	196
Tabla 53 Valores normalizados de las 14 ramas de los transformadores analizados tras un periodo de envejecimiento trabajando en un régimen estándar.	200
Tabla 54 Valores normalizados de las 14 ramas de los transformadores analizados tras someterse a un tratamiento de reacondicionado.....	201
Tabla 55 Valores normalizados de las 14 ramas de los transformadores analizados tras someterse a un tratamiento de secado de parte activa.	202
Tabla 56 Valores normalizados de las 14 ramas de los transformadores analizados tras someterse a un tratamiento de regeneración.	203
Tabla 57 Valores normalizados de las 14 ramas de los transformadores analizados tras someterse a un tratamiento de regeneración.	205

RESUMEN

El presente documento de tesis está enfocado en el empleo de la técnica de Recovery Voltage Measurement (RVM) o Tensión de Reabsorción, en castellano, para mejorar el análisis de la condición del dieléctrico de un transformador de potencia del tipo papel aceite, y en concreto para la evaluación del estado del dieléctrico tras procesos de mejora de la condición del mismo como son el reacondicionado, el secado y la regeneración, si bien es aplicable a la evaluación de procesos de envejecimiento siempre que la evaluación pueda ser realizada respecto a un ensayo de huella realizado previamente.

Para facilitar la lectura se adjunta un diagrama en el que se muestra el camino seguido y los productos intermedios obtenidos hasta alcanzar las conclusiones finales, todos estos pasos han sido expuestos en este resumen a la vez que forman la estructura de esta tesis.



La técnica RVM ha sido empleada desde hace décadas para evaluar la condición de dieléctrico tanto líquido como sólido de transformadores de potencia, si bien como se ha descrito en la literatura, cuando existen fenómenos de polarización interfacial debidos a la presencia de compuestos polares depositados en la interface entre los dos dieléctricos, el efecto de estos compuestos sobre la respuesta obtenida solapa la respuesta de cualquier otro mecanismo de polarización. Esto provoca que la técnica en si misma pierda eficiencia, dado que pierde sensibilidad frente a la presencia de otros compuestos como puede ser el agua y los resultados obtenidos pierden validez para la evaluación del estado del dieléctrico de una manera amplia, quedando el diagnostico reducido al mero hecho de hacer patente que existe este tipo de contaminación.

El ensayo de tensión de reabsorción RVM se divide en tres etapas, una vez cortocircuitadas las bobinas pertenecientes a un mismo nivel de tensión, son obtenidos dos conjuntos, para un transformador de dos devanados, un conjunto compuesto por las tres bobinas de alta tensión y otro conjunto compuesto por las tres bobinas de baja tensión el cual se referencia a tierra. De esta manera el transformador eléctricamente se habrá convertido en un condensador, una vez ejecutado el setup de la prueba, se ejecutan los tres procesos en orden secuencial:

- Es aplicada una tensión continua V (típicamente 2000V) durante un tiempo T . La presencia de un campo eléctrico E continuo, hará que los dipolos presenten es el dieléctrico se orienten en oposición a la dirección del campo E , la velocidad de esta orientación estará ligada al tipo de la misma, así como a la estructura atómica de los compuestos que se orientan, el resultado después del tiempo T y en función de su duración será que existirán compuestos completamente orientados, otros que se encuentren en proceso e incluso algunos, en el caso de que T sea un tiempo muy cortos, que no habrán comenzado a orientarse.
- Durante $T/2$ se cortocircuitan los dos terminales, es decir se unen los devanados de alta y baja tensión, terminado el tiempo $T/2$ es abierto el cortocircuito, este tiempo habrá permitido que parte del dieléctrico vuelva a su posición de equilibrio si bien otra parte no habrá llegado al equilibrio por lo que estará parcialmente orientado en la dirección del campo eléctrico E aplicado previamente.
- Es medida la tensión presente entre los dos terminales una vez abierto el cortocircuito, el efecto de los compuestos que no han regresado a su posición de equilibrio generará una tensión, la cual evolucionará hasta un máximo el cual es registrado, V_{max} , mientras el sistema se de descarga completamente.

Este proceso se realiza 14 veces en las cuales el tiempo de carga en cada ciclo es el doble del empleado en el ciclo anterior. Los tiempos carga comienzan en 0.1 segundos y finalizan en 819.2 segundos.

La representación habitual de los resultados de un ensayo RVM consiste en mostrar en el eje de abscisas el tiempo de carga del ciclo y en el eje de ordenadas la tensión máxima registrada en ese ciclo. Este sistema de representación como ha sido indicado está muy condicionado por determinados mecanismos de polarización, así como por la superposición de la contribución de los distintos mecanismos que en ocasiones hace difícil su interpretación, cuestión esta que ha menoscabado la popularidad de esta técnica en el sector industrial en favor de técnicas como la Frequency Domain Spectroscopy (FDS).

En la actualidad existen tres técnicas aplicadas en la evaluación de la condición del dieléctrico de un transformador, dos de ellas en el dominio del tiempo como son las corrientes de polarización y despolarización (PDC) y la tensión de reabsorción (RVM) y una de ellas el dominio de la frecuencia la ya citada FDS, todas ellas como así se indica en literatura son sensibles a los mismos mecanismos

de polarización dentro del dieléctrico, por lo que todas describen los mismos mecanismos físicos cada una de ellas con sus particularidades.

Un material dieléctrico compuesto, en el caso de ser simple (un solo compuesto o un compuesto homogéneo) está exento de polarización interfacial, presenta una serie de mecanismos de polarización. El fenómeno de polarización consiste en la orientación de los distintos dipolos existentes en el dieléctrico en oposición respecto del campo eléctrico que se les aplica anulándolo y confiriendo al material la propiedad de ser aislante. Los principales mecanismos de polarización son:

- Electrónica: Consiste en que en el interior de la molécula la nube de electrones se desplaza bien físicamente o bien permaneciendo más tiempo en una zona de la órbita en concreto, generando un dipolo en una molécula que inicialmente no es iónica.
- Iónica: en el cual, bien sea por variación del ángulo que forman los enlaces o por la orientación de dipolos se generan momentos dipolares.
- Interfacial: en el que la interfaz entre dos dieléctricos se generan dipolos entre moléculas de ambos dieléctricos en combinación.
- Orientacional: consistente en que todas las moléculas del dieléctrico roten para que su orientación genere un campo E equivalente y opuesto al campo aplicado abandonando estas su posición de equilibrio, este mecanismo en función de la geometría de la molécula y de todas las moléculas circundantes puede variar mucho en el tiempo.

Estos mecanismos requieren que el campo eléctrico E sea aplicado un determinado tiempo, desde la polarización electrónica la cual puede considerarse prácticamente instantánea a la orientacional que requiere mucho más tiempo, incluso dentro de lo que se puede considerar orientacional hay diferencias, una molécula polar pequeña disuelta en el aceite se orientará mucho más rápido, que una molécula larga del papel, sin embargo, cuanto más envejecido o des polimerizado se encuentre el papel más cortas son las cadenas que forman las fibras de papel y menor será el tiempo que requieren para orientarse.

El modelado de un dieléctrico admite distintos grados de complejidad. El modelo más simple constará únicamente de un condensador entre los dos puntos en tensión, mediante la adición de componentes en paralelo es posible ajustar mejor el comportamiento del modelo a la realidad. El siguiente nivel de complejidad puede ser alcanzado añadiendo una resistencia en paralelo del condensador, la cual representa las fugas por conducción, siendo este el modelo apropiado para analizar el ensayo de factor de pérdidas dieléctricas o tangente de delta, el cual es ampliamente aceptado como ensayo para conocer el grado de envejecimiento o contaminación de un dieléctrico. El modelo puede ser aún más fidedigno respecto de la realidad si en paralelo al condensador y a la resistencia de conducción son añadidas ramas RC con constantes de tiempo $\tau = R \cdot C$ distintas, las cuales representarán los distintos mecanismos de polarización, este circuito compuesto por la conexión en paralelo de un condensador, una resistencia y n -ramas RC se conoce como circuito equivalente de Debye, siendo este el modelo empleado en este documento para caracterizar los distintos dieléctricos. Existen modelos más complejos en los que se conectan en serie un circuito equivalente de Debye por cada componente del dieléctrico, sin embargo, el empleo de este modelo exige un conocimiento de la geometría del transformador que en la práctica no es realista obtener.

Con estos elementos es ajustado, mediante un algoritmo diseñado en Matlab, un circuito equivalente cuya respuesta coincida con la respuesta obtenida en un ensayo real de tensión de reabsorción.

El modelo goza de sentido físico dado que los distintos elementos son representativos de los componentes del sistema dieléctrico del transformador, siendo la capacidad, la capacidad geométrica del sistema dieléctrico medida y obtenida en el ensayo de capacidad, la resistencia representa la resistencia de conducción del sistema para el tiempo infinito, la cual es extrapolada en base a los valores obtenidos minuto a minuto de resistencia de aislamiento durante diez minutos, y las distintas ramas RC representan a los distintos mecanismos de polarización que se dan en el dieléctrico. Como ya ha sido indicado los distintos mecanismos de polarización tienen constantes de tiempo diferentes, por lo que las distintas ramas representarán a distintos compuestos con distintos mecanismos de polarización. Es decir, en un primer ciclo de reabsorción de 0,1 segundos los mecanismos más rápidos de polarización reaccionarán mientras que mecanismos de polarización más lentos en su orientación no tendrán tiempo a orientarse para responder al campo eléctrico, sin embargo en el último ciclo durante 819,2 segundos actuarán todos los mecanismos de polarización si bien durante el tiempo en el que se cortocircuitan los dos terminales del objeto bajo prueba que es de 409,6 segundos, aquellos mecanismos más rápidos habrán vuelto a su estado de equilibrio, por lo que durante la fase de media se obtendrá la respuesta de los mecanismos de polarización más lentos aislada de la respuesta de los mecanismos más rápidos. Como puede ser apreciada la dupla de tiempos de polarización y despolarización permite que en los distintos ciclos de ensayo puedan ser discriminados unos mecanismos de polarización de otros. Por lo tanto, la capacidad de cada rama RC representará la cantidad de energía que es capaz de almacenar el dieléctrico en función de un mecanismo de polarización que ha actuado. En cierto modo el sistema puede ser entendido como un sistema elástico en el que los distintos mecanismos de polarización se asemejan a muelles amortiguados que son deformados y que cuando la fuerza cesa recuperan su posición original liberando la energía elástica acumulada.

Esto ha permitido que, mediante la evaluación de múltiples ensayos previos y posteriores a un tratamiento de aceite, en el que se es conocedor de las sustancias extraídas del transformador, y mediante análisis de sensibilidad sea posible evaluar aquellas ramas que son sensibles a los distintos compuestos presentes en el dieléctrico.

Para la evaluación de la sensibilidad se ha implementado un circuito equivalente con 14 ramas con constante de tiempo predefinida, es decir se ha optado por sistema que muestree en una serie de tiempos predefinidos haciendo esta evaluación sistemática, frente a un sistema con constantes de tiempo variables gobernado el número de ramas mediante una función de optimización, de esta manera se posibilita hacer un análisis de sensibilidad sistemático.

El estudio de sensibilidad se ha llevado a cabo evaluando los resultados obtenidos en los transformadores a los que se les ha sometido a un proceso de mejora de la condición del dieléctrico, de tal manera que se puede correlacionar el proceso y sus efectos con aquellas ramas que han variado, es decir:

- Reacondicionado, es un proceso en el que únicamente se extrae agua disuelta en el aceite.
- Secado de parte activa, procedimiento por el que se extrae agua disuelta en el aceite y una parte del agua atrapada en el papel.
- Regeneración sin polarización interfacial, procedimiento por el que se eliminan compuestos polares disueltos en el aceite.
- Regeneración con polarización interfacial, procedimiento por el que se eliminan los compuestos polares disueltos en el aceite y se arrastran los compuestos polares depositados y/o adheridos en la superficie del dieléctrico sólido.

Las conclusiones extraídas en base al análisis sistemático de la sensibilidad del circuito y sus distintas ramas, han sido que se han identificado las constantes de tiempo de las ramas que son sensibles a los distintos mecanismos de polarización.

- Hasta 0,2 segundos se discrimina el contenido en humedad del aceite.
- Hasta 0,4 segundos se discrimina el contenido en humedad del papel
- De no existir polarización interfacial, las ramas con constantes de tiempo 1,6 segundos para compuestos polares disueltos en el aceite y 6,4 segundos para compuestos polares filtrados en el papel o productos de descomposición del papel.
- Cuando existe una fuerte polarización interfacial predomina la rama con constante de tiempo de 6,4 segundos, mostrándose la sensibilidad prácticamente constante desde la rama de 3,2 segundos hasta la rama de 12,4 segundos.
- Para los casos de envejecimiento del dieléctrico ha sido identificado que hay una alta sensibilidad de la rama con constante de tiempo 208 segundos, por lo que se ha catalogado esa rama como uno de los principales marcadores de la despolimerización del papel. En todo caso al envejecimiento del aislamiento celulósico muestran sensibilidad las ramas con constantes de tiempo comprendidas entre 24,8 segundos y 409,6 segundos.

Estos resultados mejoran en gran medida la capacidad de evaluación de la condición del dieléctrico de un transformador, siendo su aplicación industrial inmediata en diversos procesos de toma de decisión tales como:

- La evaluación de los procedimientos de mejora de la condición del dieléctrico, dado que puede ser evaluada no solo la mejoría global del dieléctrico, si no, que se pueden discriminar compuestos llegando a indicarse que un procedimiento ha podido ser muy eficiente respecto a un compuesto e ineficiente frente a otro pese a que el resultado global sea bueno.
 - La toma de decisiones sobre transformadores, los cuales se pueden encontrar o parezcan encontrarse al final de su vida útil, sobre la mejor estrategia bien sea de mejora de la condición o bien sea de no aplicar ningún procedimiento por entenderse que el dieléctrico ha alcanzado un punto irrecuperable.
 - Simulación de resultados de procedimientos previos a la ejecución de cualquier acción.
- al mismo tiempo que se ha demostrado como cierto lo expresado el documento Cigré 254:

“RVM, PDC and FDS. It concluded that all three methods are sensitive to the same polarization and conduction phenomena in the transformers' dielectric, and that regardless of whether time or frequency domain measurements are used, mathematical modeling is necessary to understand the properties of an insulation system”.

El empleo de un modelo matemático permite un mejor entendimiento de las propiedades del aislamiento.

Por último, el empleo del circuito equivalente propuesto en este documento y su evaluación permite mejorar la sensibilidad de la técnica RVM en aquellos casos en los efectos de la polarización interfacial hace imposible la evaluación completa de la respuesta en base a la representación tradicional de tiempo de carga-tensión máxima alcanzada en cada ciclo. La representación de la capacidad de cada una de las ramas de polarización y su correlación con determinados compuestos o modos de polarización permite que se salve este obstáculo. De esta forma se puede equiparar la sensibilidad de la técnica RVM, muy criticada, a la que presentan otras técnicas como es el FDS en particular.

Alcanzado este punto, son varias las líneas de investigación y desarrollo que pueden ser exploradas:

- Una primera es el empleo de modelos desarrollados en laboratorio que permitan hacer análisis de sensibilidad sobre una sola variable, de tal manera que la respuesta obtenida pueda ser adaptada a modelos que permitan cuantificar las variaciones.
- Conocidos los rangos de tiempo en los que se han identificado los distintos mecanismos de polarización, es posible realizar un trabajo de optimización del circuito equivalente reduciendo el número de ramas empleado.
- Conocidas las constantes de tiempo que son sensibles a los distintos procedimientos de mejora de la condición del dieléctrico, es posible optimizar el procedimiento de ensayo reduciendo el número de ciclos y aplicando únicamente aquellos ciclos que permitan evaluar el procedimiento aplicado al dieléctrico.

Todas estas líneas de desarrollo están enfocadas a optimizar el tiempo de parada necesaria de un transformador para su evaluación, cuestión que mejorará las ratios de disponibilidad de los activos.

1 Definición del problema

1.1 Casuística actual

En este apartado, será presentado el transformador como activo, teniendo en cuenta su valor económico, su longevidad, la necesidad de mantenimiento del fluido dieléctrico y su explotación segura, todo ello para alcanzar los objetivos de vida útil del mismo, de amortización como activo e incluso de extensión de vida útil. Existe una máxima dentro del mundo del mantenimiento del transformador “la vida del papel, es la vida del transformador, cuando el papel alcanza el final de su vida útil, la vida del transformador ha terminado”, esta afirmación se sustenta en que el aislamiento de un transformador está compuesto de aceite dieléctrico el cual puede ser tratado, regenerado o incluso sustituido y de papel o aislamiento celulósico el cual se deteriora desde el mismo momento en el que la parte activa es secada en el horno en la fábrica en un proceso continuado en el tiempo e irreversible.

Conocer el estado del papel que conforma el aislamiento de un transformador no es tarea fácil al ser este una máquina cerrada e inmersa en aceite, y aun cuando sea acometido el complicado y costoso proceso de desencubar el transformador, no es factible analizar el papel ya que este forma parte de los bobinados, lo que le hace de muy difícil acceso en las espiras internas, e imposible de muestrear sin destruir el aislamiento. Por todo esto para estimar la condición del aislamiento celulósico siempre se diagnosticará de manera indirecta.

Para conocer la condición del conjunto aislante papel aceite son empleadas técnicas que podemos dividir en dos grandes grupos:

- Químicas: en las cuales se miden propiedades químicas del aceite, y compuestos disueltos en el mismo, como son gases (CO y CO_2), compuestos furánicos (2-FAL como principal compuesto) [1], o bien mediante la detección de distintos alcoholes también producto de la descomposición del papel [2].
- Eléctricas: en las que se emplea la espectroscopía como técnica para, en función de la respuesta estimar la condición global del aislamiento e intentar aislar la actuación de las distintas partes del conjunto en contribuciones individuales, estas técnicas se dividen en espectroscopía en dominio del tiempo PDC (corrientes de polarización y despolarización) y RVM (Tensión de recuperación, o tensión de reabsorción) y espectroscopía en dominio de la frecuencia FDS (Frequency Domain Spectroscopy)

Este documento se centrará en el empleo de la técnica RVM (Recovery Voltage Measurement o Tensión de Reabsorción en castellano), y su empleo para la determinación de la condición de un transformador tras haberse sometido a un proceso de purificación del aceite.

Como se ha indicado, dentro de un aislamiento papel-aceite, aislamiento tradicionalmente empleado en los transformadores de potencia, solo se puede actuar sobre la condición del aceite, siendo la condición del papel un proceso de degradación continuo, si bien sí que es posible actuar sobre la velocidad de este proceso. Es necesario conocer el estado del aislamiento para aplicar el procedimiento adecuado sobre el aceite el cual permitirá mejorar el aislamiento del transformador y reducir la presencia de compuestos que catalizan la despolimerización del papel.

1.2 Propuesta de solución

El objetivo que se plantea es: mediante un algoritmo calcular el circuito equivalente de Debye a partir de la respuesta obtenida en un ensayo RVM, y poder determinar que ramas de polarización de dicho circuito son sensibles en función del procedimiento que se aplique para mejorar la condición del dieléctrico líquido, de esta manera se podrá evaluar la bondad de las acciones acometidas, evaluar si el tratamiento ha sido satisfactorio o evaluar la viabilidad de un tratamiento previo a su realización. Esta metodología dista del actual sistema en el cual se evalúa el resultado obtenido de manera visual y agregada de todos los efectos, siendo en ocasiones muy difícil o incluso imposible su evaluación completa. [3]

Para alcanzar el objetivo establecido y mencionado ha sido trazado un libro de ruta del cual en etapas intermedias se extraerán productos intermedios. Los pasos a seguir serán:

- a. Estudio del arte y presentación de una base teórica, en los que se profundizará sobre los mecanismos de envejecimiento de los aislantes tipo papel aceite los productos de descomposición, cómo se detectan y diagnostican, así como la física de dieléctrico que dará sentido al circuito equivalente escogido. El producto final será la decisión justificada de emplear el Modelo Extendido de Debye.
- b. Desarrollo del circuito equivalente.
- c. Una vez desarrollado el circuito equivalente serán realizados diversos test de sensibilidad respecto a los distintos componentes del circuito, correlacionándolos con su sentido físico. Este ejercicio permitirá una obtener un profundo conocimiento del circuito equivalente y su interpretación correlacionado con los fenómenos físico que se dan en el dieléctrico de un transformador.
- d. Desarrollo del algoritmo, una vez se conoce el circuito equivalente con el que pretende modelar el comportamiento del dieléctrico, es necesario desarrollar un algoritmo con el cual sea posible obtener los elementos del circuito equivalente en base a un ensayo de RVM complementado con datos obtenidos en ensayos habituales en el mantenimiento como son la resistencia de aislamiento y la capacidad.
- e. Para validar el algoritmo desarrollado se ha testado los resultados obtenidos por otros autores empleando sus propios modelos, con el resultado que se ha obtenido empleando los mismos parámetros en el algoritmo desarrollado.
- f. Se han empleado 32 ensayos reales previos y posteriores a un procedimiento de mejora de la condición del dieléctrico, mediante estos casos se ha podido realizar los respectivos análisis de sensibilidad, los cuales se han correlacionado con los parámetros que han variado en la condición del dieléctrico del transformador. Se ha obtenido en este paso como subproductos conclusiones individualizadas de forma empírica, al tiempo que se han identificado ejemplos de aplicación.
- g. El análisis integrado de todos los resultados obtenidos ha permitido la obtención de patrones y áreas de influencia de las distintas sustancias.
- h. Finalmente han sido elaboradas unas conclusiones que dan respuesta al problema definido, siendo los productos finales:
 - Un algoritmo aplicable a la obtención del circuito equivalente de Debye empleando como in-put ensayos estandarizados.
 - Se ha mejorado la sensibilidad del ensayo RVM en situaciones de polarización interfacial
 - Aplicación directa de los resultados obtenidos en la industria

Todo ello se representa en el siguiente diagrama de flujo:

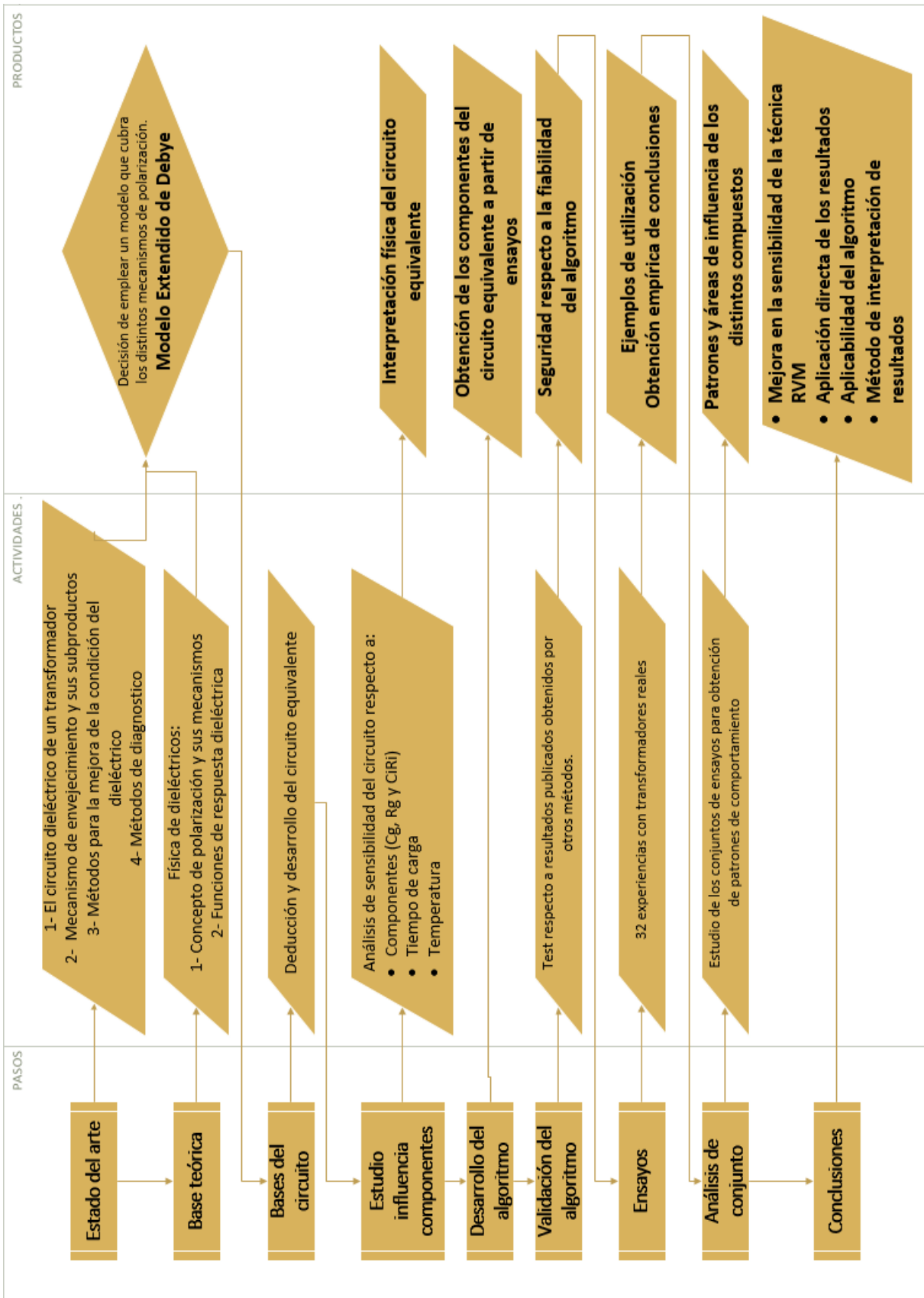


Figura 1 Diagrama de flujo desarrollo de la solución propuesta

i.

2 Estado del arte

El objetivo del presente documento es estudiar un sistema alternativo de evaluación de los resultados obtenidos en un ensayo RVM, para ello es necesario hacer mención a todos los actores de este proyecto poniéndolos en contexto.

A lo largo de este apartado será presentado el transformador como activo longevo, dentro de un contexto de mantenimiento y vida útil, será descrito el circuito dieléctrico del transformador dado que es sobre el que ha sido puesto el foco. El circuito dieléctrico presentado es el más comúnmente empleado en transformadores de potencia, el cual es el compuesto por aislamiento celulósico y fluido dieléctrico mineral, lo que se denomina aislamiento papel-aceite, no formarán parte de este documento aislamientos compuestos por papeles mejorados térmicamente (NOMEX), aislamientos híbridos o aislamientos sólidos, o aquellos formados por fluidos dieléctricos alternativos como ésteres, siliconas, si bien son materiales comúnmente empleados y en expansión. En la actualidad por coste, propiedades o rendimiento se emplean en aplicaciones concretas con requerimientos especiales.

Una vez definido el circuito dieléctrico se hablará de los productos y subproductos que se generan durante la vida y el normal envejecimiento de los componentes del circuito dieléctrico (papel Kraft y aceite mineral dieléctrico), y cómo estos mismos productos tienen la propiedad de actuar como catalizadores de las reacciones que aceleran el proceso de envejecimiento.

Finalmente serán explicadas las técnicas existentes para determinar la condición de un aislamiento prestando especial atención a las técnicas eléctricas de espectroscopía y se hará un repaso de los procedimientos normalmente aplicados para devolver al dieléctrico líquido a una condición buena.

2.1 El transformador

En el ámbito de la generación, el transporte y la distribución de energía eléctrica el transformador es una pieza clave, siendo múltiples las aplicaciones y las adaptaciones que se han realizado para ajustar el equipo a la tarea específica la cual le será encomendada, siempre sin perder de vista su función, que es transformar una energía eléctrica de entrada con unos valores de tensión y corriente determinados en una energía eléctrica de salida con otros valores distintos en función de la relación de transformación.

El concepto del transformador no ha variado, lo que ha variado es su construcción, en lo relativo al aislamiento, que es ámbito de este documento, existen múltiples soluciones, desde transformadores secos a transformadores aislados con ésteres vegetales o sintéticos, con aislamientos celulósicos o con aislamiento sólido híbrido incluso con aislamientos térmicamente mejorados.

Hoy en día y en los últimos 70 años, para la fabricación de transformadores de potencia se ha empleado el aislamiento de papel-aceite, que está compuesto de papel Kraft y aceite mineral dieléctrico, materiales que, aunque han mejorado con el tiempo, mantienen sus principales características. Dado que salvo en aplicaciones especiales sigue siendo la tecnología predominante tienen sentido intentar progresar en el estudio de su condición a fin de optimizar la explotación del transformador.

Desde un punto de vista económico el transformador es uno de los activos más costosos si no el más en los sistemas de transporte y distribución, y representa un alto porcentaje de la inversión en los sistemas de generación de energía eléctrica, siendo un elemento difícil de reemplazar y que genera grandes indisponibilidades en caso avería. Se trata de un activo longevo, su vida esperada es de 40 años, al igual que su periodo de amortización, aunque es

cierto que en la actualidad se contemplan escenarios en los que con sobrecargas controladas el factor de envejecimiento del activo incrementaría reduciendo su vida útil y dado que es controlado, su periodo de amortización también disminuiría [4]. En la actualidad en especial para aplicaciones de generación renovable, eólica y solar, en la que la vida estimada de la planta se conoce, se propone el empleo de transformadores adaptados y dimensionados a los ciclos de carga esperados a fin de optimizar su vida útil para que esta se aproxime a la vida útil de la planta de generación. [5]

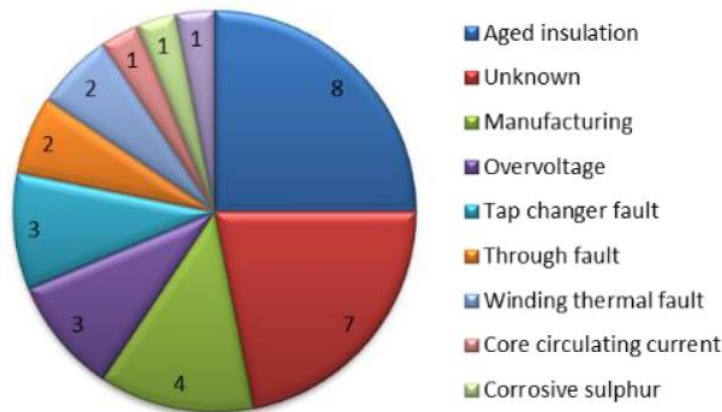


Figura 2 Fallos en transformadores, fallos y tipos [6]

Existe un dicho muy extendido acerca de la vida de un transformador que dice: “*la vida de un transformador es la vida de su papel*” y aunque no es una afirmación que se cumpla en el 100% de las ocasiones no es carente de verdad, como se puede apreciar en la figura 2, los fallos denominados “Aged insulation” representan el 25% de los fallos en transformadores, seguido del apartado “Unknown”, el resto de causas se podrían catalogar de efectos externos o bien fallos en componentes mecánicos como pueden ser los cambiadores. El papel, del que posteriormente será estudiado en mayor profundidad por efectos de la temperatura, la humedad, el estrés dieléctrico, la acidez y el estrés mecánico sufre un proceso de despolimerización, y pese a que las características dieléctricas se mantienen las características mecánicas se ven mermadas lo que hace que el papel se torne quebradizo e incapaz de soportar esfuerzos lo que conduce a su ruptura y por lo tanto al fallo eléctrico del transformador (figura 3)

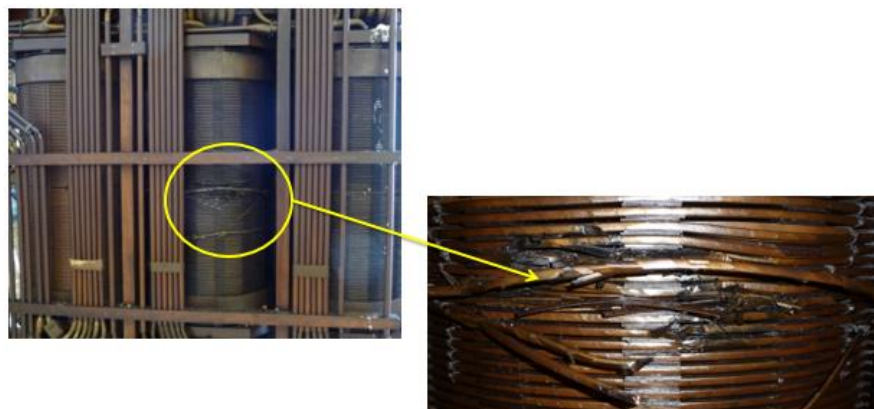


Figura 3 Cortocircuito provocado por colapso mecánico del papel aislante [Archivo personal]

Como ya ha sido mencionado con anterioridad, sobre la condición del papel no se puede actuar durante la vida en servicio del transformador, y es por esto que conocidas las causas por las que este se deteriora es necesario actuar sobre los catalizadores del proceso de deterioro del papel, causas tales como la presencia de humedad en el aceite, la alta acidez del aceite o la existencia de compuestos polares disueltos también en el fluido dieléctrico, es por este motivo por el que los tratamientos para mejorar la condición del aceite dieléctrico son de vital importancia para extender la vida útil del papel, si bien no es conveniente abusar de ellos, dado que tratamientos como el secado pueden ocasionar la pérdida de tensión mecánica del papel con la consiguiente aparición de oquedades.

2.1.1 El circuito dieléctrico del transformador

Durante el diseño del transformador se puede ser realizada una división en distintos circuitos los cuales, aunque correlacionados, permiten realizar un diseño por bloques o por circuitos, estos circuitos son:

- Circuito eléctrico
- Circuito magnético
- Circuito térmico
- Circuito dieléctrico

Dado el enfoque de este documento se centra en el circuito dieléctrico y en particular en sus componentes los cuales serán descritos a continuación poniendo el foco sobre los aislamientos denominados papel-aceite, los cuales a su vez se componen de papel kraft, aceite mineral dieléctrico y barreras de pressboard que en todo caso es un aislante celulósico.

2.1.1.1 *Papel kraft* [7], [8], [9]

El papel es uno de los materiales dieléctricos más baratos y con mejores características dieléctricas que se conocen.

Los papeles dieléctricos deben cumplir con determinadas características físicas y químicas; además, deben cumplir con las especificaciones de propiedades eléctricas. Las propiedades eléctricas dependen, en general, de las propiedades fisicoquímicas del papel, las más importantes son:

- Alta rigidez dieléctrica;
- Constante dieléctrica una vez impregnado lo más próxima posible a la constante dieléctrica del aceite, para evitar grandes gradientes de campo eléctrico.
- Bajo factor de pérdidas dieléctricas
- Ausencia de partículas conductoras.

La constante dieléctrica del papel es de aproximadamente 4,14 mientras que la del aceite del transformador es de 2,2, en un circuito aislante compuesto de estos dos materiales en serie, el estrés dieléctrico se repartirá en proporción inversa a la constante dieléctrica de los materiales por lo que este estrés será el doble en el aceite que en el papel, para un diseñador este no es el mejor escenario ya que lo ideal sería que fueran similares para compartir el estrés dieléctrico equitativamente entre ambos materiales. Como puede ser apreciado en la figura 4 papeles más modernos como el NOMEX ofrecen mejores prestaciones en múltiples sentidos (constante dieléctrica, térmica, mecánica,...) sin embargo su precio hace que este tipo de papel se reserve para transformadores con exigencias especiales de funcionamiento o de tamaño.

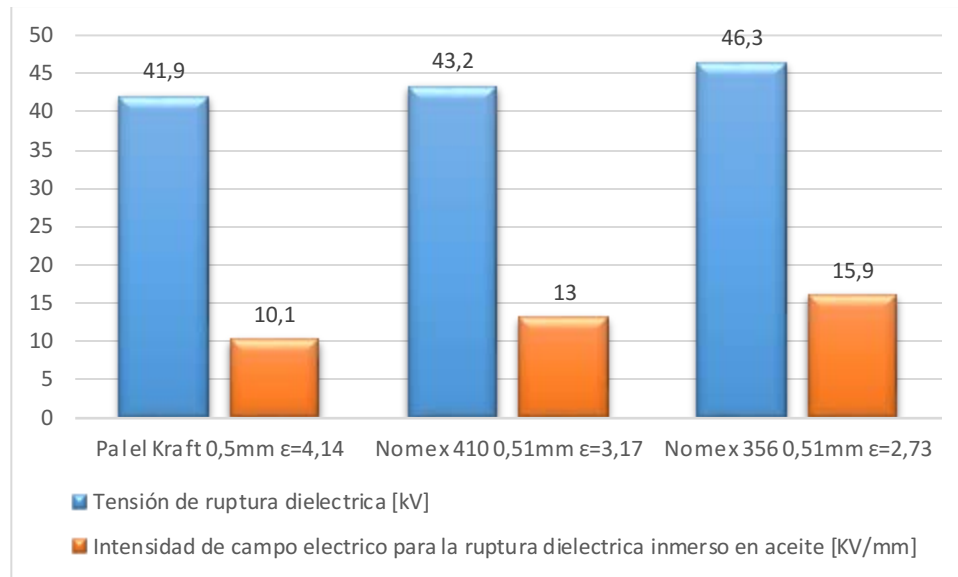
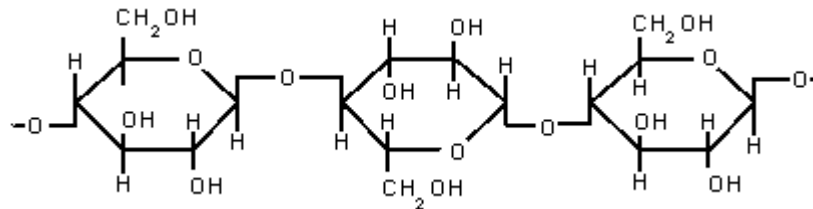


Figura 4 Constante dieléctrica de papel Kraft frente a papeles térmicamente mejorados NOMEX. Fuente DUPONT

El papel kraft se fabrica, por definición, íntegramente a partir de pasta de madera blanda no blanqueada, se emplea el proceso del sulfatado, y no se blanquea porque el proceso de blanqueamiento da como resultado un residuo ligeramente alcalino, pH 7-9, a diferencia del proceso de sulfito menos costoso que se utiliza comúnmente para la producción de papel de prensa. El contenido de ácido conduce a una rápida degradación de las moléculas de celulosa de cadena larga y, por consiguiente, la pérdida de las propiedades mecánicas que sería inaceptable para fines eléctricos.



Fuente: Archivo:Estructura celulosa.png - <https://es.wikipedia.org>

Figura 5 Polímeros enlazados (β -glucosas) que forman las fibras de papel

La madera se muele inicialmente hasta obtener una fina textura triturada utilizando muelas abrasivas o similares. En función del origen de la madera esta estará compuesta por entre un 40-50% de celulosa, lignina entre el 15 y el 35% y hemicelulosa entre un 25 y un 30%, el proceso de sulfatado químico elimina la mayoría de los otros componentes de la madera, (lignina, carbohidratos, ceras, etc.), para dejar sólo las fibras de celulosa. Las fibras están dispersas en agua que se escurre para dejar una estera de pulpa de madera. En esta etapa, el producto seco la estera puede ser transportada a la instalación del fabricante de papel especializado. Por definición, el papel prensado se somete a cierta compresión durante la fabricación, lo que aumenta su densidad, mejora el acabado de la superficie y aumenta la resistencia mecánica. La producción de papel prensado es un proceso continuo en el que el papel se forma sobre un tambor de malla fina giratorio y consiste en construir la hoja de papel a partir de varias capas individuales.

La cohesión de las fibras entre sí es casi exclusivamente una propiedad de las fibras de celulosa. La celulosa se compone de una cadena polímeros de hidratos de carbono formada

por unidades de glucosa con un nivel de polimerización de aproximadamente 2000. La figura 5 muestra su estructura química.

Las moléculas de hemicelulosa representan el segundo componente en proporción de los productos purificados pulpa de madera. Se trata de hidratos de carbono con un nivel de polimerización de menos de 200. En una cantidad limitada, facilitan el proceso de enlace de hidrógeno, pero la resistencia mecánica se reduce si su cantidad supera aproximadamente el 10%. Las moléculas de hemicelulosa también tienen la desventaja de que son compuestos hidrófilos lo que hace que el papel sea más difícil de secar.

Una vez el papel se encuentra en el transformador y ya en el proceso de secado durante la fabricación el papel paulatinamente pierde enlaces entre los polímeros produciéndose la degradación o despolimerización del papel.

La degradación tanto de la celulosa como la del aceite, es un proceso complejo que es catalizado por la acción combinada del agua, los ácidos, el calor y el oxígeno, todos ellos presentes en el interior del transformador. Depende esencialmente de los siguientes procesos:

- **Degradación hidrolítica:** Los enlaces de oxígeno existentes en la celulosa son afectados por el agua, lo que conlleva la formación de azúcares C5 y C6. Con posterioridad, existe un proceso de deshidratación catalizado por los ácidos y se producen compuestos furánicos. [7]
- **Degradación oxidativa:** La celulosa es un material muy sensible a ser oxidado. Los grupos hidroxilos son las zonas mas sensibles a ser muy afectadas donde se forman los grupos carboxilo y carbonilo y pudiendo darse reacciones subsiguientes causando escisiones en cadena. Los compuestos de bajo peso como el H_2 , CO , CO_2 y H_2O son usualmente producidos. [7]
- **Degradación pirolítica:** Dentro del rango de temperatura superior a 120-140°C, la degradación del aislante celulósico se acelera. A dichas temperaturas, pueden darse reacciones rápidas en las que existe una degradación pirolítica sin la presencia de oxígeno o agua. Los principales subproductos de este modo de degradación que son generados son los óxidos de carbono y el agua. [7]

Dado que estos procesos de degradación tienen lugar y producen los diversos subproductos de descomposición, hay varios elementos observables en el aceite del transformador que se emplean como medida indirecta del grado de degradación del aislante celulósico. Sin embargo, los investigadores y los profesionales del mantenimiento siguen teniendo el reto de establecer las correlaciones cuantitativas apropiadas entre la concentración de los productos de descomposición del aislante celulósico en el aceite y el grado de envejecimiento del mismo, fundamentalmente porque algunas de estas especies químicas son también productos de la descomposición del aceite.



Figura 6 Fibras de papel nuevo [10]

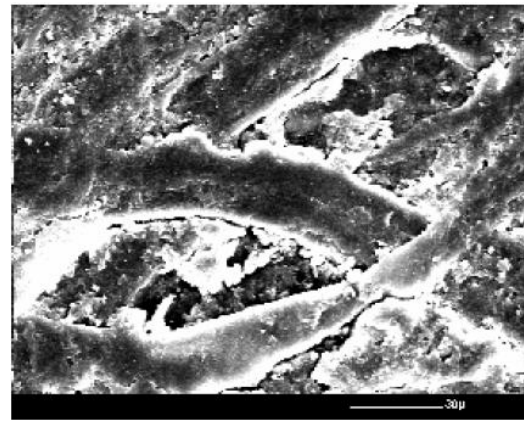


Figura 7 Fibras de papel sometidas a una temperatura de 160°C [10]

Las figuras anteriores (figura 6 y figura 7) muestran los resultados de los estudios SEM (Scanning Electron Microscopy) de un papel nuevo recién fabricado y de un papel que ha sido sometido a un proceso de envejecimiento térmico, las fibras de celulosa se han roto en diferentes lugares y se han deformado y perforado, formando un denso empaque de fibra en varios lugares. [10]

2.1.1.2 Pressboard

En su forma más simple, el cartón prensado no representa más que un aislamiento grueso papel fabricado mediante la colocación de varias capas de papel en la fase húmeda de fabricación. Tantas capas finas como sean necesarias para proporcionar el espesor requerido se laminan en húmedo sin un agente adhesivo. Sin embargo, el tablero de prensado se puede dividir en dos categorías básicas:

- Fabricado exclusivamente a partir de capas de papel en estado húmedo sin ningún tipo de adhesivo.
- Fabricado, por lo general a un espesor mayor, mediante la adhesión de placas individuales con un adhesivo adecuado.

El pressboard se utiliza para enrollar plataformas de soporte, bloques de soporte, terminaciones de bobinado y piezas separadoras, así como tacos para asegurar y soportar cables.

2.1.1.3 Aceite dieléctrico

Independientemente del crudo a partir del cual se refine un aceite dieléctrico para transformador, contendrá hidrocarburos parafínicos y nafténicos. A excepción del "aceite blanco", el aceite aislante también contiene compuestos aromáticos y otras moléculas en concentraciones variables. La composición del aceite acabado dependerá de la elección del crudo y del procedimiento de refinado.

Independientemente del origen el aceite mineral dieléctrico este ha de realizar las siguientes funciones:

- **Refrigerante:** disipa el calor, su aptitud como refrigerante viene dada por la viscosidad del aceite y su punto de congelación.
- **Aislante eléctrico:** por su capacidad para soportar altos campos eléctricos. Esta propiedad del aceite se monitoriza mediante los análisis rutinarios de la tensión de ruptura dieléctrica y/o el factor de disipación dieléctrica.
- **Informa:** sobre las condiciones internas del transformador, para ello se recurre comúnmente a los análisis rutinarios fisicoquímicos y de gases disueltos en el aceite.

La composición del aceite mineral tiene diferentes efectos en el comportamiento del aceite durante su vida útil, algunos de los compuestos presentes en el aceite son beneficiosos, otros en función de la proporción pueden ser beneficiosos o llegar a ser problemáticos si se presentan en exceso, en función de estos compuestos y de la habilidad del fabricante las proporciones serán unas u otras, algunos de los compuestos fundamentales del aceite son:

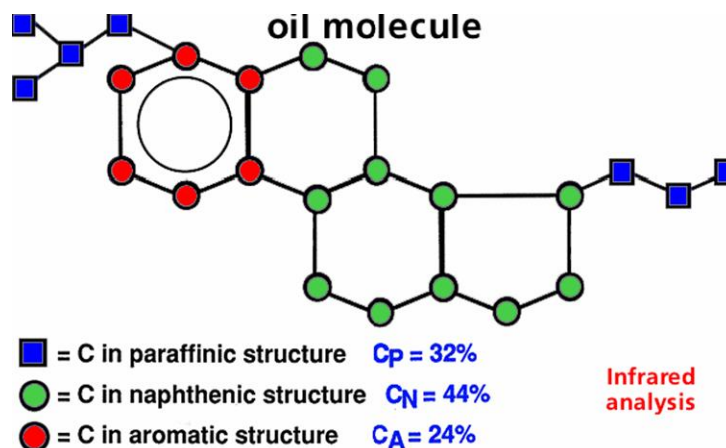


Figura 8 Representación de una molécula de aceite mineral dieléctrico, compuesto por hidrocarburos parafínicos, nafténicos y aromáticos. Fuente NYNAS NAPHTHENICS

- Hidrocarburos parafínicos: Existen dos tipos de moléculas parafínicas en el aceite de transformador: de cadena recta y ramificadas. Las de cadena recta denominadas parafinas o n-alcenos predominan, se considera que tienen propiedades pobres a baja temperatura ya que cristalizan al enfriarse la temperatura del aceite. Las parafinas son disolventes pobres de agua y productos de oxidación, dando como resultado que facilitan la presencia de agua libre y los lodos (agua/aceite/suspensión sólida) que finalmente precipitarán. Las parafinas también tienen menor estabilidad térmica que otros hidrocarburos.
- Hidrocarburos nafténicos: Las moléculas nafténicas son alcanos cíclicos. La estructura del anillo puede contener cinco, seis o siete átomos de carbono, pero seis es el más común. A diferencia de las parafinas, los naftenos tienen excelentes propiedades a baja temperatura, lo cual es importante para los transformadores instalados en los climas más fríos. Los compuestos nafténicos también poseen mejores características como disolventes para productos de oxidación. Sin embargo, los compuestos nafténicos que se encuentran en la fracción utilizada para los aceites de transformadores son más volátiles que los compuestos parafínicos. Como resultado, los aceites con alto contenido nafténico tienden a tener un valor más bajo de punto de inflamación.
- Hidrocarburos aromáticos: Los hidrocarburos aromáticos están presentes en todos los aceites de transformadores menos en los más refinados. Las propiedades químicas y físicas de los compuestos aromáticos difieren mucho de los compuestos nafténicos, pero tienen constantes dieléctricas similares. Hay muchas estructuras aromáticas con un solo anillo de benceno, llamado mono-aromático, y el benceno en sí mismo. puede estar presente. La fracción aromática de un aceite de transformador es importante porque la mayoría de los inhibidores naturales a la oxidación son aromáticos.

Los requisitos de un aceite nuevo para transformadores se encuentran normalizados de acuerdo a la norma IEC 60296 [11] y la supervisión de su evolución a lo largo del tiempo

también se encuentra normalizada de acuerdo a la IEC 60422 [12], siendo en todo caso los principales requerimientos:

- Cumplir con los mínimos especificados de aislamiento, el aceite debe tener una alta rigidez dieléctrica y un bajo factor de disipación dieléctrica para soportar los requerimientos dieléctricos durante el servicio.
- Cumplir con los mínimos especificados de transferencia de calor y enfriamiento, el aceite debe tener una viscosidad y un punto de fluidez que sean lo suficientemente bajos para asegurar que la circulación del aceite no se vea afectada en las condiciones más extremas de baja temperatura para el equipo.
- Cumplir con los criterios de extinción de arco, el aceite dieléctrico requiere un alto punto de inflamación, a la par que un alto nivel de tensión de ruptura dieléctrica y baja viscosidad, para proporcionar suficiente aislamiento y capacidad de refrigeración, asegurando así que el arco sea se extinguido.

Para garantizar este comportamiento los siguientes parámetros son monitorizados:

- La viscosidad del aceite debe ser lo suficientemente baja para asegurar que el aceite fluya bien por el interior de todo el transformador, especialmente en condiciones de baja temperatura, lo que proporciona el enfriamiento necesario y, propiedades de extinción de arco.
- El punto de fluidez está relacionado con la viscosidad y debe ser lo suficientemente bajo para asegurar que el aceite fluya. satisfactoriamente en condiciones de baja temperatura.
- El contenido de humedad del aceite debe ser bajo, de lo contrario, la función dieléctrica del aceite se verá afectada y la humedad se absorberá por el aislamiento celulósico, lo que reducirá la vida útil del aislamiento y aumentará el riesgo de ruptura dieléctrica.
- La tensión de ruptura debe ser lo suficientemente alta para proporcionar una resistencia dieléctrica que impida la ruptura del aceite bajo tensión eléctrica.
- El factor de disipación dieléctrica (DDF) la tangente del ángulo de pérdidas y comúnmente conocido como tan delta, tiene que ser suficientemente bajo para asegurar que las pérdidas dieléctricas sean pequeñas y que el aceite, por lo tanto, proporciona unas propiedades aislantes satisfactorias.
- Los aceites bien refinados deben tener un color amarillo claro y una apariencia limpia. Deben estar libres de material en suspensión y materias extrañas.
- El aceite debe tener un alto valor de tensión interfacial (IFT) para asegurar la ausencia de compuestos polares disueltos.
- El aceite debe tener un bajo contenido de azufre y no contener azufre corrosivo.
- El aceite debe tener una baja acidez (valor de neutralización) para eliminar los riesgos de formación de lodos y corrosión.
- El aceite nuevo debe tener un bajo contenido de furánicos, de lo contrario, la eficacia de la monitorización de la condición mediante la evaluación de la tendencia del contenido de furánicos se ve afectada.
- El aceite no debe contener niveles de contaminación por ningún metal individual.

2.1.2 Envejecimiento del aislamiento papel-aceite

Como ya se ha hecho referencia, el aislamiento papel aceite es el aislamiento más comúnmente empleado en transformadores de potencia, por coste, durabilidad y sencillez

siempre que la aplicación a la que está destinado el transformador no exija características que hagan más ventajoso el empleo de otros aislantes [13].

El conjunto papel aceite ofrece sinergias como el aumento de la tensión de ruptura dieléctrica del conjunto

$$12 \frac{kV}{mm_{papel}} + 40 \frac{kV}{mm_{oil}} = (52)64 \frac{kV}{mm} \quad (1)$$

lo que representa una mejora del conjunto de un 23% con respecto a la suma de los comportamientos individuales, también existen sinergias negativas, como puede ser que los productos de envejecimiento catalizan recíprocamente la descomposición o la merma en las características [13].

En teoría, los productos finales de degradación de la celulosa son el agua y los óxidos de carbono. Obviamente, en la vida real ningún transformador puede ser operado hasta el punto en que todo el papel esté totalmente degradado. En un sentido estricto solo una parte de la celulosa al final de la vida útil estará suficientemente degradada, aquella que haya estado sometida a mayores temperaturas, estrés dieléctrico y en contacto con compuestos catalizadores de la despolimerización.

La importancia de los productos de descomposición viene dada por el cumplimiento de uno o más de los siguientes criterios:

- Su presencia puede constituir una amenaza para el funcionamiento seguro del transformador.
- Afecta a la tasa de envejecimiento del sistema de aislamiento
- Puede utilizarse como indicador de envejecimiento o tiene algún otro valor diagnóstico.

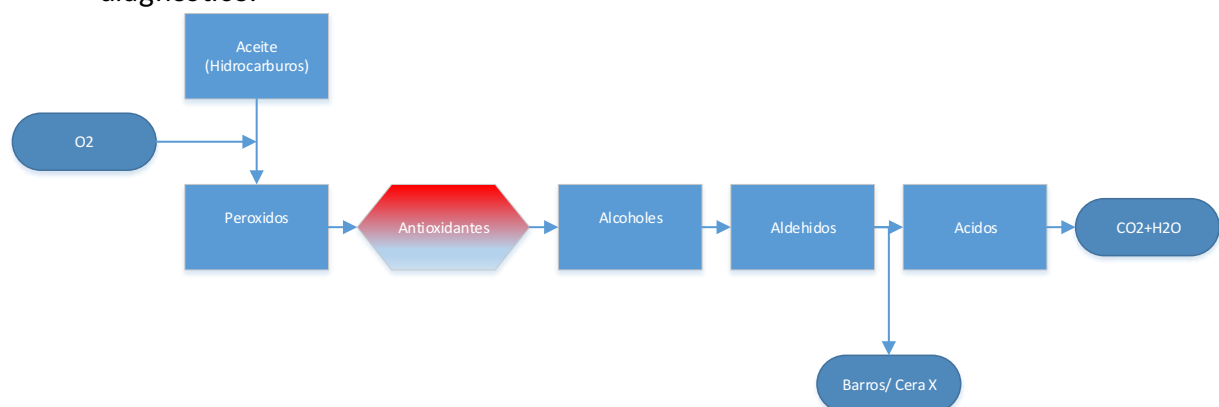


Figura 9 Proceso de oxidación del aceite, evolución de los productos de descomposición [13]

En la figura 9 se muestran los distintos subproductos de la descomposición del aceite a lo largo del proceso, finalmente el proceso arroja como subproductos finales CO₂ y agua que a su vez atacará al papel acompañada de ácidos que también catalizan la descomposición del papel y por último los barros, ceras x o x-wax (en función de la literatura), que generará polarización interfacial, y dificultará la refrigeración haciendo que aumente la temperatura, como se puede observar todo está relacionado en un círculo vicioso.

Los principales productos de degradación del papel y el aceite son:

- **Agua:** El agua es el producto de degradación dominante del papel y el cartón. Está formado por las reacciones de deshidratación posteriores a la hidrólisis (que en realidad consume agua), pero también es un producto final en la oxidación del aceite y del papel.

- **Ácidos:** La hidrólisis del papel produce ácidos. La reacción inicial de hidrólisis provoca la escisión de la cadena de celulosa. Se producen reacciones de deshidratación, en las que el 5-hidroximetil-2-furfuraldehído es un producto importante. Esta sustancia se descompone fácilmente en ácido levulínico y ácido fórmico. Cabe señalar que estos ácidos también experimentan otras reacciones. El ácido levulínico puede formar un compuesto polimérico ácido (conocido como "caramelo"), mientras que el ácido fórmico puede descomponerse en monóxido de carbono y agua.

La oxidación también produce ácidos (figura 9). Pueden formarse ácidos libres (por ejemplo, pequeños ácidos carboxílicos), así como grupos ácidos unidos a la cadena molecular de la celulosa. Obviamente, la oxidación del papel (así como del aceite) está asociada a la presencia de oxígeno. Cuanto mayor sea el contenido de oxígeno, mayor será la tasa de oxidación. Sin embargo, como ya se ha señalado, los ácidos pueden formarse por otras vías distintas de la oxidación, especialmente la hidrólisis. Muchos de estos ácidos tendrán un bajo peso molecular, por lo que serán volátiles, y por lo tanto mostrarán un bajo punto de ebullición. También tendrán una alta polaridad, lo que significa que serán hidrófilos, tendiendo a disolverse fácilmente en el papel.

- **Compuestos furánicos:** Los "compuestos furánicos" se refieren a toda una familia de compuestos, todos los cuales podrían ser descritos como derivados del furano. El más abundante es el 2-furfural (2FAL), pero el 2-acetilfuran (2ACF), 5-metil-2-furfural (5MEF), 5-hidroximetil-2-furfural (5HMF) y 2-furfurilalcohol (2FOL) también se han encontrado en aceite y papel. Su determinación se describe en la norma IEC 61198.

El 5HMF y el 2FAL se forman por reacciones de deshidratación después de la hidrólisis de la celulosa y la hemicelulosa. Pero quizás más importante, todos los compuestos furánicos mencionados anteriormente también se generan por pirolisis oxidativa.

Por lo general, no se considera que la presencia de compuestos furánicos influya en el envejecimiento del aceite o el papel de forma significativa. Sin embargo, la monitorización de estos compuestos es muy importante para el mantenimiento, dado que su presencia es sintomática de que existe envejecimiento, mientras que su ausencia no garantiza que no se esté produciendo la degradación.

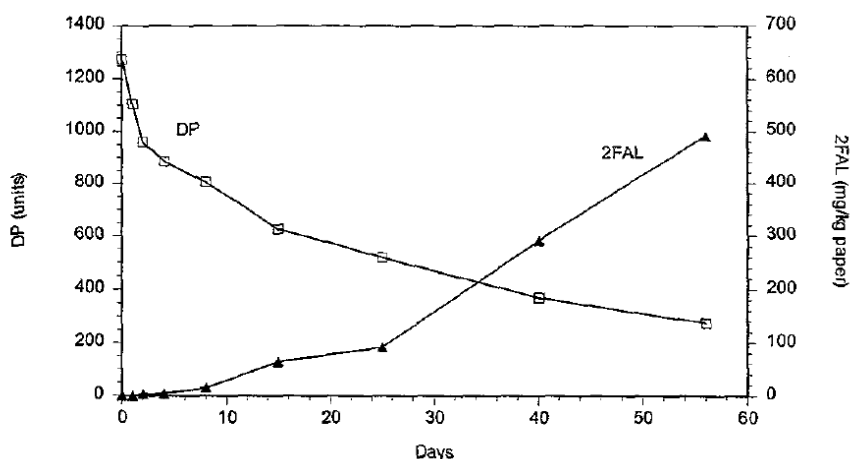


Figura 10 Evolución del grado de despolimerización (DP) y del furfural (2FAL) durante el envejecimiento del papel [14]

- **Óxidos de carbono:** El CO y el CO₂ son productos de degradación final de todos los componentes del papel y el cartón. En menores cantidades también el CO y el CO₂ son

productos de la oxidación del aceite. El contenido de aceites de estos gases siempre se mide en el análisis de gases disueltos, y las tasas de producción y las cantidades relativas de CO_2 y CO se utilizan en la interpretación de los resultados. Un contenido muy alto de CO_2 debido a la degradación del papel puede influir en la acidez del aceite y, por lo tanto, complicar la evaluación del estado del aceite.

- **Lodos, cera X o x-wax:** Comúnmente englobados en el término “lodo”, estos consisten en productos de degradación que tienen baja solubilidad en el aceite. Los lodos pueden estar presentes en forma de partículas en suspensión o como depósitos. La mayor parte de los lodos se deben a la oxidación del aceite, pero es muy probable que los productos de degradación de otros materiales (incluido el papel) contribuyan a la cantidad total. La baja solubilidad de los lodos se debe a la alta polaridad, y posiblemente hasta cierto punto a un alto peso molecular, ya que algunos productos de degradación pueden polimerizarse.



Figura 11 Ejemplo de depósito de lodos sobre el yugo de un transformador [Archivo personal]

Los grandes depósitos de lodo pueden ser un obstáculo para el flujo de aceite y, por lo tanto, impedir el enfriamiento adecuado de todas las partes de los devanados. Los lodos como norma general suelen ser muy ácidos y contienen peróxidos, con todo ello se ha demostrado que favorecen la degradación del papel. Dado que los lodos son principalmente productos de la oxidación del aceite, la prevención de la acidificación del aceite también previene la formación de lodos. Por lo tanto, cualquier medida que se tome para prolongar la vida útil del aceite también será una medida contra la formación de lodos.

Tabla 1 Procesos interrelacionados de la degradación del papel-aceite

Proceso	Causado por	Sub-producto	Catalizado por
Hidrólisis	H_2O	$\text{H}_2\text{O} + \text{ácidos} + \text{lodos}$	Ácidos
Oxidación	O_2	$\text{CO}/\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{ácidos} + \text{lodos}$	Metales como Cu e iones de Fe
Pirólisis	Temperaturas $>140^\circ\text{C}$	$\text{CO}/\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{ácidos} + \text{lodos}$	Lodos

En un transformador real todos estos procesos, hidrólisis, oxidación y pirólisis, actúan simultáneamente, resultando en una trama no lineal de Arrhenius (lo que dificulta la aplicación de una sola energía de activación) describiendo toda la complejidad de los procesos de degradación. El proceso que dominará depende de la temperatura y de la condición global del transformador. Probablemente también se producen efectos sinérgicos entre las diferentes reacciones; por ejemplo, la oxidación puede activar hidrólisis. Sin embargo, a título ilustrativo, asumiremos procesos independientes. La degradación total por lo tanto será la suma de la degradación de cada proceso [13]:

$$\tau_{Total} = \left(A_{Oxidacion} e^{\frac{-E_{oxi}}{R \cdot T}} + A_{Hidrolisis} e^{\frac{-E_{hid}}{R \cdot T}} + A_{Pirólisis} e^{\frac{-E_{pir}}{R \cdot T}} \right) \quad (2)$$

donde oxi, hid y pir se utilizan como subíndices para identificar la energía de activación E y el factor ambiental A para los procesos singulares mencionados anteriormente. Simplificando un poco, se puede decir que las tasas de degradación de estas reacciones dependerán de la energía de activación y del entorno de cada proceso a la temperatura dada. Las tasas de envejecimiento dependerán de la temperatura, dependiendo del proceso que domine en la región específica, como puede ser apreciado en la figura 12

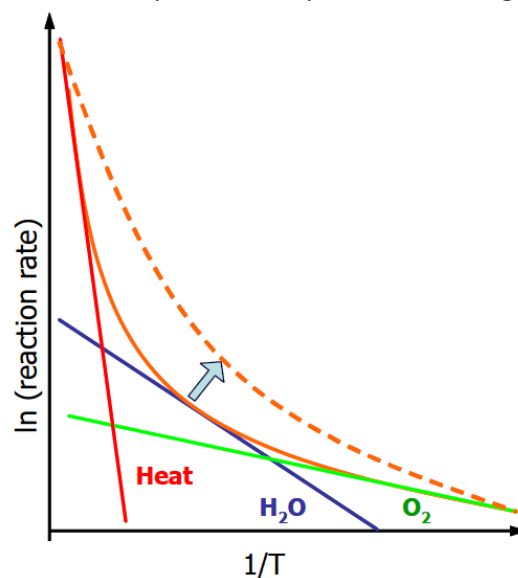


Figura 12 Esquema de las distintas tasas de envejecimiento en función de los mecanismos de envejecimiento, la flecha indica el efecto del aumento de la humedad en los factores A [13]

2.2 Procesos de mejora de la condición del fluido dieléctrico de los transformadores aplicables en campo.

En base a lo expuesto en el apartado anterior, es fundamental para optimizar la vida del transformador que el fluido dieléctrico se encuentre en las mejores condiciones posibles lo que a su vez repercutirá en que el aislamiento celulósico verá reducido al mínimo posible su tasa de envejecimiento.

Los procesos a los que se somete al aceite se pueden dividir en dos grupos:

- Procesos de reacondicionado y secado, que están orientados a eliminar el mayor porcentaje posible de humedad ya sea solo del aceite dieléctrico o bien del aceite

dieléctrico y del aislamiento celulósico lo que es un procedimiento mucho más lento y costoso en campo.

- Procesos de regeneración, los cuales están orientados a eliminar los compuestos polares del aceite y limpiarle de partículas, estos procesos requieren del empleo de filtros y tierras absorbentes, en ocasiones si la cantidad de lodos presente en el aceite es muy elevada se pueden aplicar procedimientos por los que se rocíe con aceite de sacrificio la superficie de los devanados a fin de arrastrar esos lodos.

En función de los resultados de las analíticas de aceite y/o de los ensayos eléctricos realizados se determinará cual es el tratamiento más adecuado para el transformador. La decisión sobre qué tratamiento ha de aplicarse o incluso si se aplica el tratamiento necesario no es una decisión baladí ni exenta de responsabilidad, son varias y de diversos ámbitos las implicaciones que tiene el realizar o no un tratamiento, algunas de las cuales son:

- Económicas, la realización de un tratamiento en campo es un proceso que tiene un coste económico elevado, dado que supone el desplazamiento de un equipo de tratamiento móvil y varias jornadas de trabajo en turnos 24 horas al día. En ocasiones si la posición es imprescindible y es imperiosa la necesidad de tratar el aceite por el riesgo que corre el transformador, es necesario el desplazamiento e instalación de un transformador móvil.
- De operación: en función del tratamiento, este se podrá realizar on-line u off-line, en ambos casos es necesario desconectar el transformador durante la conexión y de desconexión de las mangueras del equipo de filtrado, cuando el tratamiento es off-line el transformador estará desenergizado con la indisponibilidad asociada al descargo y en el modo on-line el transformador no tendrá tanta indisponibilidad pero su explotación ha de ser en régimen especial, con el disparo por relé buchholz deshabilitado para evitar que disparos provocados por la circulación de aceite, adicionalmente se suele configurar la red para descargar en la medida de lo posible esa posición y minimizar el impacto.
- Erosión y cargas estáticas: durante un proceso de tratamiento, se hace circular aceite a velocidades normalmente superiores a las que circula el aceite durante la explotación normal del transformador, más aún en los casos de transformadores con refrigeración ONAN. Los efectos perniciosos que pueden aparecer para la condición del transformador serán; por un lado, la fricción del aceite contra los devanados puede ocasionar la carga estática del transformador y, por otro lado, esa misma fricción puede generar una erosión indeseada en partes de los devanados, pudiendo ambos efectos ser la causa raíz de un fallo dieléctrico del transformador.
- Riesgos para la condición del transformador: para un transformador la presión de apriete de los devanados es fundamental para soportar los esfuerzos a los que se ve sometido durante un cortocircuito, la presión con la que los devanados están sujetos varia con la vida del transformador al variar el grosor del aislamiento fruto de los ciclos de expansión y compresión y a la degradación del mismo, cuando un transformador es deshidratado extrayendo la humedad de los devanados esto puede traducirse en una pérdida de volumen de las espiras del devanado muy abrupta que afectará a su comportamiento ante cortocircuito [15].

Respecto a la variación de volumen del aislamiento celulósico en función del grado de humedad se puede observar en la figura 13 los resultados obtenidos en los ensayos realizados por Weiman (fabricante de aislamientos celulósicos de clase mundial) en los que demuestra este aspecto, el cual ha de ser tenido muy en cuenta [16] [17].

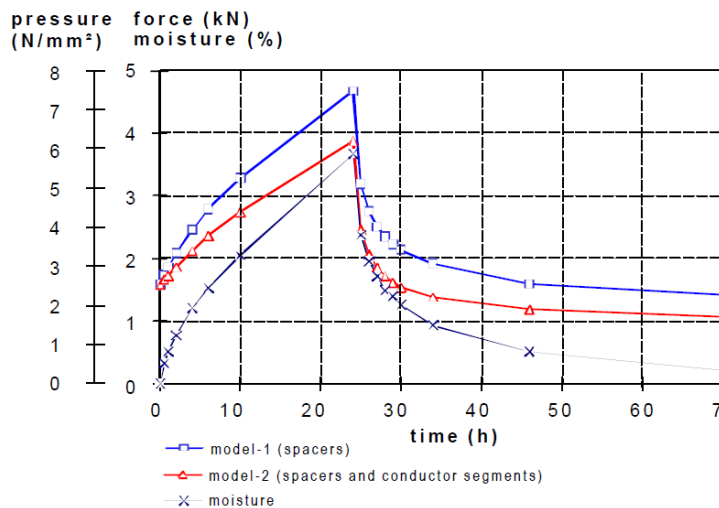


Figura 13 Evolución de la presión soportada por las probetas de prueba en función del grado de humedad [16]

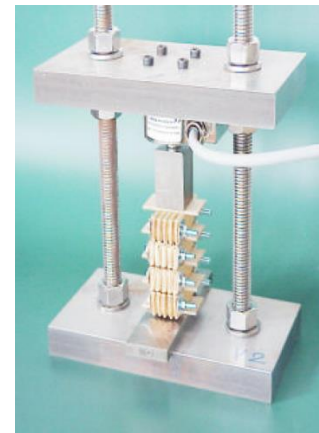


Figura 14 Montaje de probeta de prueba para verificar el cambio de presión en función de la humedad (model 2) [16]

2.2.1 Tratamientos de reacondicionado y secado

La humedad y los gases disueltos en el aceite pueden ser eliminados mediante tratamiento térmico y de vacío. El proceso es bien conocido por la industria y usado rutinariamente, los primeros equipos de filtrado datan de 1921 fabricados por Micafil [18]. El equipo para este trabajo está disponible comercialmente y se utiliza con éxito. El proceso de eliminación de la humedad puede realizarse a temperatura atmosférica o a temperaturas más altas. El procedimiento más común se basa en calentar el aceite y someterlo a vacío para eliminar los gases y la humedad, seguido de un filtrado para eliminar cualquier partícula.



Figura 15 Equipo de filtrado de aceite móvil saliendo de los talleres de Micafil sobre 1930 [16]

Este proceso mejora la tensión de ruptura del aceite y reduce la humedad, los gases disueltos y las partículas. El equipo de secado y desgasificado es utilizado para el llenado de transformadores en fábrica o in situ. Este proceso puede implicar aplicar vacío al transformador para logra una impregnación completa del papel con aceite. Se debe tener precaución al aplicar vacío, ya que no todos los transformadores están diseñados para soportar vacío. La unidad de deshidratación se utiliza para eliminar la humedad del papel del

transformador haciendo circular el aceite del transformador a la unidad de deshidratación. Este procedimiento es más eficiente a temperaturas más altas, si bien el exceso de temperatura tampoco es recomendable dado que puede degradar el aceite y el aislamiento celulósico de ahí que no sea recomendable exceder los 80°C, motivo por el cual es conveniente aplicar vacío a la cuba del transformador simultáneamente, ya que este hará disminuir el punto de ebullición del agua mejorando su extracción a una temperatura moderada.

Los procesos más empleados son:

- **Circulación de aceite con ciclos de vacío:** La planta de tratamiento de aceite calienta el aceite haciéndolo circular a través del transformador calentando este a unos 60-80 °C. A continuación, el aceite se vacía en un tanque separado. Es aplicado vacío a la cuba del transformador lo que hace que el agua se evapore del aislamiento y se bombea a través de las bombas de vacío. A través de la evaporación del agua, el aislamiento celulósico se enfría de nuevo. Por lo tanto, puede ser necesario repetir el ciclo de calentamiento varias veces, dependiendo del tamaño y del nivel de tensión del transformador.
- **Hot oil spray:** Con el transformador vacío, se rocía aceite dieléctrico sobre la parte activa. El aceite calienta la parte activa, así como el aislamiento a la temperatura de secado requerida. Finalmente, el aceite se drena completamente y se aplica vacío. Pueden ser necesarias medidas especiales de preparación para colocar las boquillas de pulverización. El proceso de secado se realiza con exclusión de oxígeno, lo que tiene una influencia positiva en el envejecimiento.
- **Secado por baja frecuencia (LFH) con circulación de aceite:** Con el transformador lleno de aceite, este se calienta por medio de la planta de tratamiento de aceite y por la circulación de corriente de baja frecuencia a través de los devanados del transformador. Después de alcanzar el escalón de temperatura, se drena el aceite al tiempo que se aplica vacío, dado que se está haciendo circular corriente por los devanados, la temperatura se mantiene y se logra una mayor homogeneidad en la temperatura de todo el devanado.
- **Equipos vapour phase móviles:** El proceso vapour phase es hoy en día el proceso de secado estándar para la producción de grandes transformadores potencia, empleado durante los procesos de fabricación, como norma general no se emplea en campo, si bien existen casos de éxito descritos en la literatura [19] [20]. El proceso se basa en la evaporación de un disolvente que se rocía en el conjunto para utilizar calor latente producido cuando el vapor del disolvente se condensa. Ya que el calentamiento se efectúa en el interior, de manera uniforme y rápidamente, el transformador puede secarse completamente sin dañar el aislamiento. Todo el secado se lleva a cabo bajo vacío sin necesidad de oxígeno. Esto ayuda a reducir la degradación del papel durante el proceso de secado.

2.2.2 Tratamientos de regeneración del aceite

De acuerdo con la norma IEC 60422 es definida la regeneración como *"un proceso que elimina o reduce los contaminantes polares solubles e insolubles del aceite dieléctrico mediante procesos químicos y físicos"* [12]. Los contaminantes en cuestión son mayoritariamente subproductos de oxidación del aceite y del aislante sólido, en especial el primero. El procesado físico y químico es típicamente una combinación de tratamiento con un material absorbente y filtrado. Es frecuente realizar la desgasificación simultáneamente. El

tratamiento de regeneración requerirá en el caso de aceites no inhibidos la inhibición del mismo tras el proceso, dado que durante la regeneración se eliminan los antioxidantes naturales del transformador, si este se pusiera en servicio sin inhibir la acidez crecería muy rápidamente.

El proceso real de regeneración de los aceites dieléctricos es básicamente el mismo ya sea el aceite inhibido como el aceite desinhibido. Los transformadores son regenerados utilizando un equipo móvil el cual contiene una mezcla de tierras de Fuller o "arcilla", a través del cual se bombea el aceite calentado previamente. La arcilla representa para el aceite una un tamiz granular altamente polar hecha de montmorillonita mezclada con óxidos metálicos, sepiolita o bentonita natural y "activada" (lo que puede implicar deshidroxilación parcial y deshidratación térmica) con objeto de incrementar el carácter polar, la superficie y la actividad catalítica de los materiales.

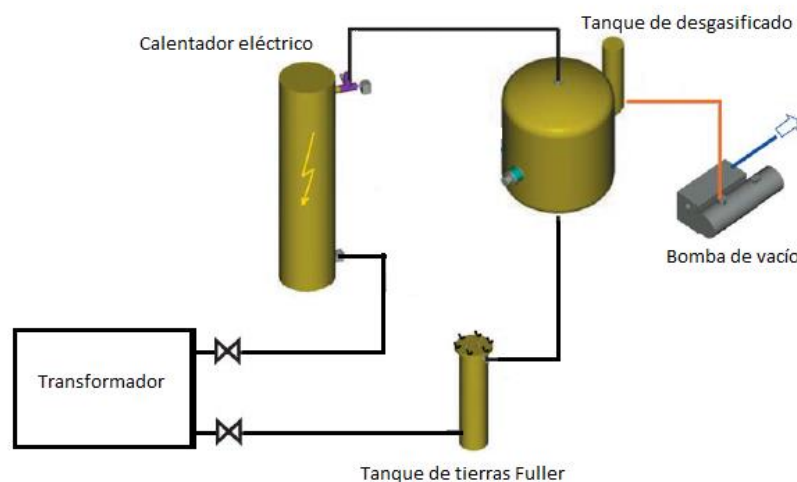


Figura 16 Esquema de configuración de equipo de regeneración [16]

El proceso de regeneración debe ser controlado estrictamente, ya que son muchos los factores que rigen el grado de efectividad de la regeneración:

- El material del que está hecha la arcilla es el que gobierna la eficacia del proceso. Tener una alta proporción de material altamente polar como el aluminio y los óxidos de silicio aumentará la polaridad de la arcilla y aumentará la cantidad de material polar eliminado o extraído del aceite.
- El nivel de activación de la arcilla es importante: el grado de eliminación del agua y de los grupos hidroxilo afecta fuertemente a las propiedades de extracción de la arcilla.
- La sección transversal de contacto del aceite a través de los lechos de arcilla, y la proporción de aceite a arcilla. La sección transversal de contacto depende del tamaño del granulado, de las dimensiones del lecho y del número de pasadas (veces que se recircula el volumen total de aceite a través del lecho) del aceite a través de los lechos. Un tamaño de gránulo más pequeño mejora el tiempo efectivo de contacto aumentando la eficiencia de la extracción, pero ralentizando el proceso de regeneración, ya que se requiere una alta presión para hacer circular el aceite a través de la arcilla. Los lechos de arcilla más largos también proporcionan un mayor contacto aceite/arcilla. Las camas más anchas disminuyen el tiempo de regeneración.
- La temperatura a la que se realiza la regeneración también es importante, ya que las temperaturas más altas permiten un mayor flujo, pero una retención menos eficiente del material polar.

El material eliminado incluye (en orden aproximado) cualquier sólido, material polar como ácidos, alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres, jabones y material aromático. Esto último no es tan importante para aceites inhibidos, pero es crítico si el aceite es no-inhibido. Muchos inhibidores de la oxidación en aceites no-inhibidores son de origen aromático (como ha sido indicado en el apartado 2.1.1.3), es por esto por lo que la re-inhibición con inhibidores añadidos es fundamental.



Figura 17 Aspecto del aceite dieléctrico en función del grado de contaminación que presenta. Fuente NYNAS NAPHTHENICS

2.3 Métodos de diagnóstico de la condición del circuito dieléctrico.

Pese a que no es ortodoxo en un documento con carácter académico, en esta ocasión una opinión personal del autor va a ser reflejada en forma de metáfora, *“nadie que tenga una caja de herramientas usa la llave inglesa para apretar tuercas y para poner clavos, para lo segundo se emplea el martillo”*, pues bien cuando se trata de ensayar un transformador o cualquier activo en general con objeto de conocer su condición, la tendencia es a buscar el ensayo único que valore la condición del activo, cuando en realidad existe un abanico de posibilidades que combinadas pueden mostrar una imagen más completa de la verdadera condición del activo.

Para conocer la condición del circuito dieléctrico de un transformador existen diversos métodos de ensayo que permitirán conocer el valor de determinados parámetros, estos métodos en una primera aproximación se pueden dividir en dos grandes grupos, métodos químicos mediante el análisis del aceite y métodos eléctricos basados en la espectroscopía dieléctrica, mediante los cuales es analizada la respuesta del global del circuito dieléctrico al tiempo que es posible aislar los distintos componentes en función de su respuesta.

2.3.1 Análisis químicos del dieléctrico.

Mediante los análisis ya sean físico-químicos o por cromatografía de gases o de líquidos son ensayos directos para reflejar la condición del aceite e indirectos para reflejar la condición del papel, es importante reseñar que la representatividad de la muestra de aceite no es completa del estado global de todo el aislamiento líquido del transformador dado que la distribución de la humedad o los compuestos polares no es homogénea a lo largo de toda la altura del transformador, siendo más representativa en los transformadores con circulación forzada de aceite.

Como se ha indicado el aceite es analizado mediante tres técnicas [12]:

- Análisis fisicoquímicos, que en realidad se compone de un conjunto de técnicas que permite conocer las características tanto físicas como químicas del aceite, la variación de estas características puede ser en sí misma una indicación de envejecimiento o bien un indicador de que el aceite está perdiendo alguna propiedad y puede ser agresivo para el papel o no garantizar la explotación segura del activo.

- Análisis por cromatografía de gases, mediante la cual se detectan los gases disueltos en el aceite, la mayoría de los gases medidos están relacionados con la detección de defectos térmicos y/o eléctricos si bien CO/CO₂ y O₂ son indicativos de oxidación o de descomposición del papel.
- Análisis por cromatografía de líquidos, es la técnica empleada para la determinación de la cantidad de compuestos furánicos presente en el aceite, indicativos de la descomposición del papel.

No se tendrá en consideración el ensayo de grado de despolimerización del papel, dado que este puede ser considerado un ensayo forense, dada la cantidad de papel necesario para llevar a cabo el análisis, y la inaccesibilidad de los puntos de muestreo durante la vida útil del transformador no es una técnica viable para el mantenimiento.

2.3.1.1 Ensayos físico químicos [12]

Existen múltiples ensayos que son aplicables sobre los aceites minerales dieléctricos, los ensayos que se listan en la siguiente tabla son los que se ha considerado que son ensayos que han de ser realizados de manera periódica debido a que son indicadores de la evolución en la condición del transformador.

Tabla 2 Ensayos para aceites minerales de rutina y complementarios

<i>Propiedad</i>	<i>Tipo de ensayo</i>	<i>Método</i>
<i>Color</i>	Rutina	ISO 2049
<i>Tensión de ruptura dieléctrica</i>	Rutina	IEC 60156
<i>Contenido en agua</i>	Rutina	IEC 60814
<i>Acidez</i>	Rutina	IEC 62021-1
<i>Factor de pérdidas dieléctricas</i>	Rutina	IEC 60247
<i>Contenido en inhibidor</i>	Rutina / Complementario	IEC 60666
<i>Sedimentos y barros</i>	Complementario	IEC 60422
<i>Tensión interfacial</i>	Complementario	ASTM D971 o EN 14210
<i>Recuento de partículas</i>	Complementario	IEC 60970

Uno de los principales inconvenientes achacables a este método es que determinados compuestos, como el agua, migran en función de la temperatura del transformador entre el papel y el aceite y aunque hay métodos de estimación no son del todo representativos, similar situación se da con los sedimentos, todos aquellos depósitos de lodos o sedimentos sobre los bobinados o el fondo del transformador no se verán representados en las muestras de aceite y siendo estos en gran medida responsables de los efectos de polarización interfacial. Sin embargo y aunque es necesario tener en cuenta estos condicionantes para hacer un correcto diagnóstico, se trata de un método simple de aplicar y económico, debido a que solo requiere de la toma de una muestra de aceite, tarea que puede ser realizada con el transformador en servicio y su envío a un laboratorio para su análisis con un coste varios ordenes de magnitud inferior al coste de realizar ensayos eléctricos.

Los ensayos referenciados en la tabla 2 nos ofrecerán diversas informaciones importantes para la evaluación de la condición del aislamiento las cuales son:

Color: El color de un aceite dieléctrico se determina mediante luz transmitida y se expresa con un valor numérico basado en la comparativa con una sucesión de patrones de

color. No se trata de una propiedad de alta criticidad, pero es útil para la evaluar tendencias. Un aumento rápido o un número alto de color puede ser un indicio de degradación o contaminación del aceite.

Adicional a la evaluación del color, la apariencia del aceite puede presentar nubosidad o sedimentos, lo que puede ser indicativo de la existencia de agua en suspensión, partículas de carbono, lodos insolubles, fibras, polvo u otros elementos contaminantes.

Tensión de ruptura dieléctrica: es la medida que determina la capacidad del fluido dieléctrico para soportar la tensión eléctrica y tiene importancia primordial para el funcionamiento seguro de los equipos eléctricos. Se trata de un ensayo muy dependiente temperatura de muestreo. Un aceite seco y limpio presenta un alto voltaje de ruptura inherente, pero si existe agua o partículas al migrar estas a los puntos con mayor estrés dieléctrico la tensión de ruptura disminuirá drásticamente. La medida de la tensión de ruptura, en conclusión, es utilizado principalmente para obtener una indicación la presencia de compuestos contaminantes como partículas o agua.

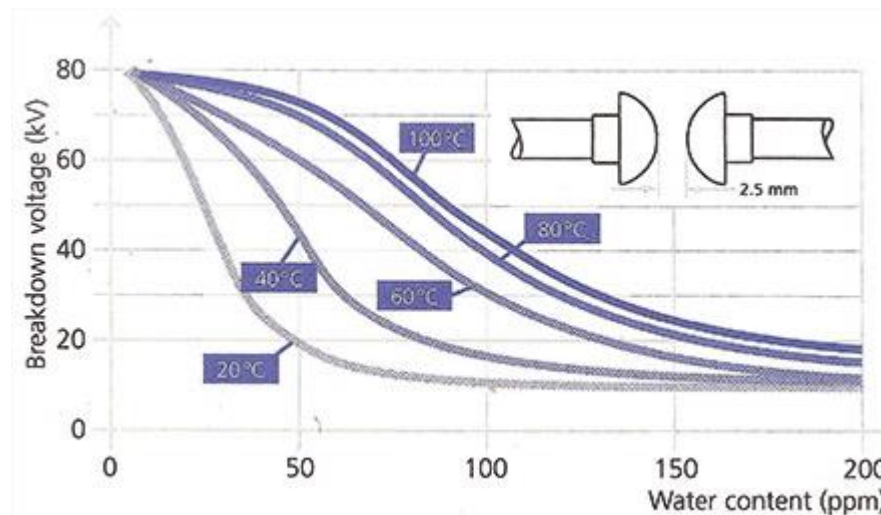


Figura 18 Dependencia de la tensión de ruptura dieléctrica con la temperatura y la humedad [21]

Agua: Sobre la humedad en el transformador existe muchísima literatura, el contenido de agua es crucial dado que influye en el corto plazo sobre la tensión de ruptura dieléctrica del aceite y en la cargabilidad del transformador dado que un nivel alto de carga (alta temperatura) combinado con un transformador hidratado es la combinación necesaria para que se formen burbujas de agua libre que desencadenan el fallo dieléctrico del transformador, Adicionalmente, en el largo plazo, como se ha indicado en la tabla 1, el agua es a la vez subproducto y catalizador de procesos de envejecimiento por lo que cierra un círculo vicioso.

El contenido de agua en el aceite como ya ha sido indicado es muy variable en función de la temperatura, por lo que es necesario conocer la temperatura a la que se extrae la muestra para poder hacer una estimación, que en todo caso no deja de ser un valor que representa un sistema que no es homogéneo y como tal y en base a esta realidad ha de ser tomado el valor obtenido.

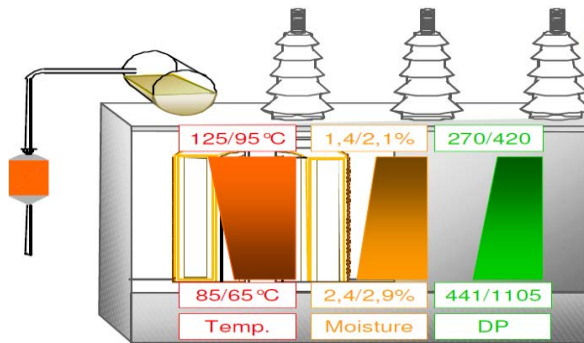


Figura 19 Distribución de temperatura, humedad y envejecimiento en función de la cota dentro de un transformador [22]

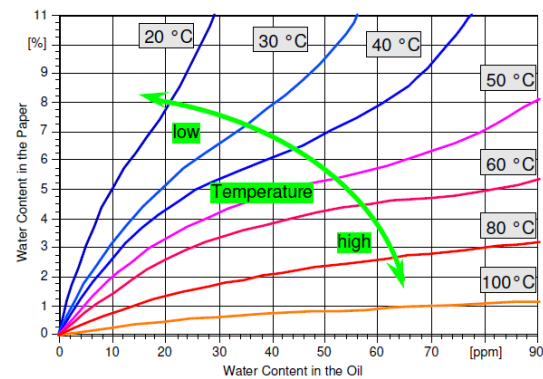


Figura 20 Distribución del agua entre el papel y el aceite en función de la temperatura del transformador [22]

Para ilustrar mejor la migración y la dificultad de estimación de la cantidad de agua existente en el transformador se ha diseñado un sencillo ejemplo:

Un transformador de 150MVAs que contiene 7 Tm de celulosa y 80.000 kilogramos de aceite al que se le toma una muestra de aceite a 40°C arroja un resultado de 16ppm de agua disuelta en el aceite.

Quiere decir que tendremos:

16 ppm de aceite=16mg/kg en 80000kg de aceite hace un total de 1,3kg de agua en el aceite

En función a la distribución de volúmenes presentado en la figura 20 a 40°C tendremos un 3% aproximado del peso total del aislante celulósico en agua atrapada en el papel, lo que representa unos 210kg de agua.

Para aproximadamente un 3% de humedad en el papel si se tomase la misma muestra a 20°C el valor de agua disuelto en el aceite no pasaría de 5ppm, pero si igualmente se tomase la muestra de aceite estado el transformador a 60°C aproximadamente tendríamos un valor de agua en aceite de 25ppm en base a la figura 20.

Acidez o valor de neutralización: la acidez de un aceite dieléctrico usado está causado por a la formación de productos de oxidación ácida. Ácidos y otros los productos de oxidación, junto con el agua y los contaminantes sólidos, atacarán al dieléctrico sólido, así como a otras propiedades del fluido dieléctrico. La formación de ácidos tiene mucha influencia en la degradación de los aislantes celulósicos, así como puede ser responsable de la corrosión de los componentes metálicos de un transformador.

La tasa de aumento del valor de acidez del aceite en un transformador se considera un indicador de la tasa de envejecimiento. El nivel de acidez se utiliza como guía general para determinar cuándo se debe reemplazar el aceite o regenerarlo.

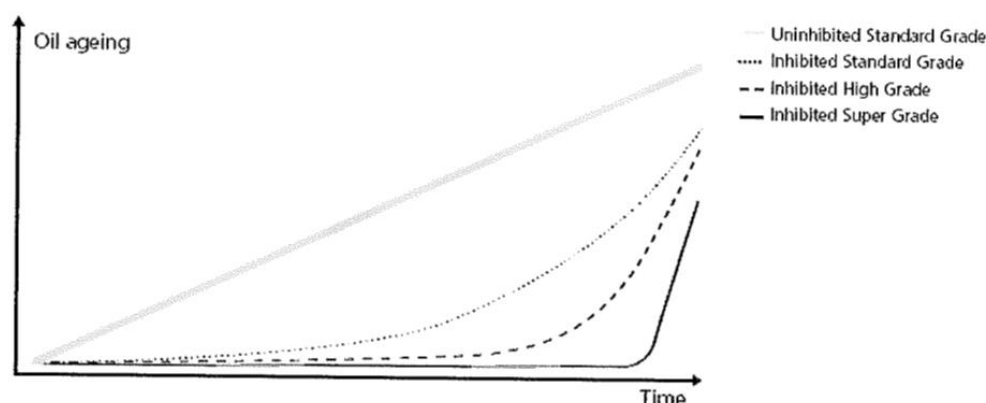


Figura 21 Evolución del grado de acidez en función de si el aceite es no inhibido o inhibido [21]

Generalmente, el aceite inhibido no debería mostrar un aumento significativo de la acidez con respecto a su valor original, siempre que el inhibidor esté presente en cantidad suficiente, como se aprecia en la figura 21 en el momento que el inhibidor se agote mostrará una subida muy abrupta en el valor de acidez. Un aceite no-inhibido mantendrá un aumento constante y sostenido en el tiempo, comportamiento completamente diferente al mostrado por los aceites inhibidos.

Factor de pérdidas dieléctricas o $\tan\delta$: Se trata de parámetro que muestra una alta sensibilidad a la presencia de coloides en el aceite, subproductos de envejecimiento o compuestos polares solubles. Las variaciones en la cantidad de contaminantes presentes son detectadas mediante la medida de esta característica con sensibilidades mayores a los métodos químicos.

Un dieléctrico ideal se puede representar como un condensador, si bien la realidad es que el dieléctrico ideal no existe, por lo que las pérdidas son modeladas como una resistencia en paralelo al condensador.

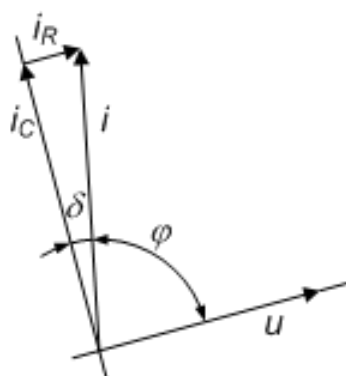


Figura 22 Diagrama fasorial corrientes circulante por un dieléctrico real [23]

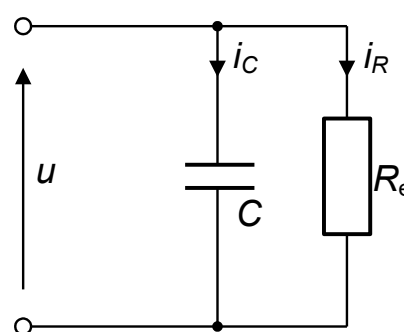


Figura 23 Circuito equivalente de un aislamiento compuesto por un condensador en paralelo con una resistencia de fuga [23]

Como norma general se asume que la capacidad del sistema eléctrico no varía por lo que se considera fijo el valor de i_C , a medida que el aceite envejece o se contamina con compuestos polares o agua su resistividad disminuye aumentando la corriente resistiva i_R , esto se traduce en un aumento en el valor de pérdidas dieléctricas por conducción y por lo tanto se trata de un indicador de pérdida de propiedades del aceite dieléctrico.

2.3.2 Métodos eléctricos para determinar la condición del aislamiento.

Actualmente existen tres métodos de diagnóstico comerciales dos de ellos en el dominio del tiempo, que son corrientes de polarización y despolarización PDC y la tensión de reabsorción RVM y un tercero en el dominio de la frecuencia denominado FDS. [3]

Para realizar diagnósticos fiables es importante entender qué cada método de diagnóstico puede caracterizar un aislamiento en función de la respuesta dieléctrica del aislamiento, con objeto de aportar luz sobre los distintos métodos a lo largo de los últimos 20 años se han editado varios documentos y normas por parte de CIGRE e IEEE como son los CIGRE Technical Brochures 254, 414 y 445 así como la norma IEEE Std C57.152.

En 2002 se publicó el Technical Brochure 254 “Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers”, centrado en los tres métodos de espectroscopía que han sido citados RVM, PDC y FDS el cual concluía que los tres métodos son sensibles a los mismos fenómenos de polarización y conducción en el dieléctrico de los transformadores, y que independientemente de que se empleen medidas en el dominio del tiempo o de la frecuencia es necesario emplear modelado matemático para comprender las propiedades de un sistema de aislamiento.

En 2010, CIGRE prosiguió este trabajo publicando el Technical Brochure 414 “Dielectric Response Diagnoses for Transformers windings” Documento en el que CIGRE combinaba la experiencia práctica con modelos matemáticos para determinar las mejores prácticas, se cubren los fundamentos del modelo X-Y, modos de prueba, casos de estudio y una comparativa respecto del método Karl Fisher Titration (KFT) para validar las estimaciones de humedad empleando métodos dieléctricos.

En 2011 CIGRE editó el Technical Brochure 454 “Special or Advanced Measurements” en el que ya se contemplaba la técnica de ensayo FDS para determinar la humedad del aislamiento sólido.

En este capítulo serán presentados los métodos FDS y PDC mencionados anteriormente, mientras que para la tensión de reabsorción RVM al ser objeto de este documento se ha dedicado un epígrafe propio (apartado 0). Del mismo modo, serán presentadas unas conclusiones acerca de qué tipo de información es realista extraer para cada método.

2.3.2.1 Corrientes de polarización y despolarización

Esta técnica puede ser considerada como un desarrollo de la medición de la resistencia del aislamiento. Consiste en la aplicación de una tensión continua de 1000V al devanado de alta tensión mientras que la baja tensión y el terciario, si existe, se aterrizarán, al tiempo que se registra la corriente circulante. Se trata de un método de prueba de corriente continua para la determinación del espectro de polarización en el dominio del tiempo de 10^{-3} a 10^3 segundos. Los fenómenos de polarización interfacial de larga duración están muy influenciados por el contenido de agua del aislamiento de papel impregnado de aceite y la absorción de los subproductos del envejecimiento.

El método consiste en aplicar una tensión tipo escalón a un dieléctrico y medir la corriente de polarización de este, después de esperar un tiempo suficiente hasta que el valor de la corriente es constante (momento en el que se supone que todos los mecanismos de polarización se han dado y la corriente constante corresponde con la corriente de conducción del aislamiento) la muestra se cortocircuita y se mide la corriente de despolarización del objeto bajo estudio. Con la comparativa de la evolución en el tiempo de dichas corrientes es posible hallar la función de respuesta dieléctrica del aislamiento.

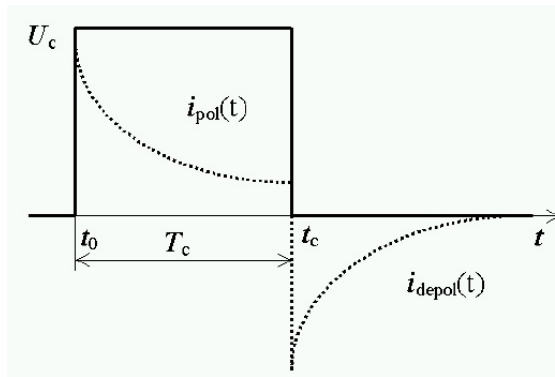


Figura 24 Corrientes medidas durante el ensayo [24]

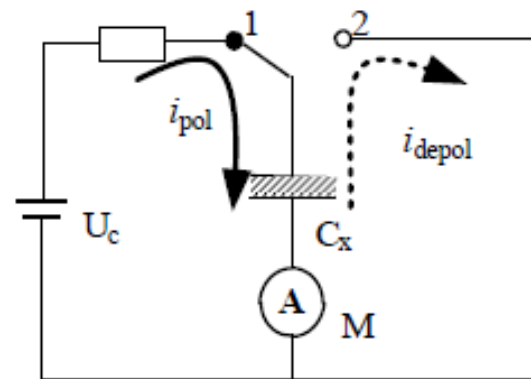


Figura 25 Diagrama esquemático del setup de un ensayo PDC [25]

Existe una gran dependencia entre las corrientes de polarización y depolarización respecto a la humedad, esta dependencia es precisamente la que hace que sea un método viable para evaluar el contenido de humedad en el circuito dieléctrico. De la misma manera las corrientes de polarización depolarización han mostrado sensibilidad a los cambios en la conductividad del aceite.

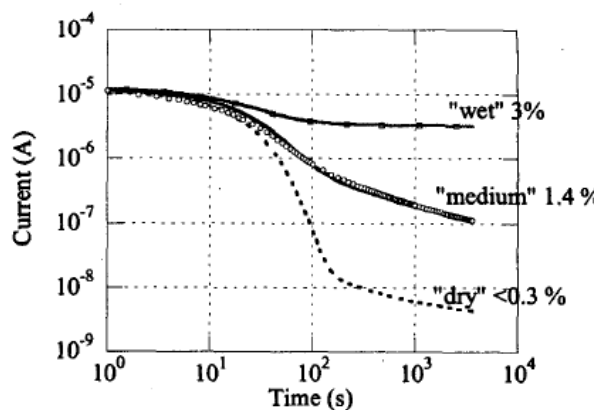


Figura 26 Efecto de la humedad en la corriente de polarización [26]

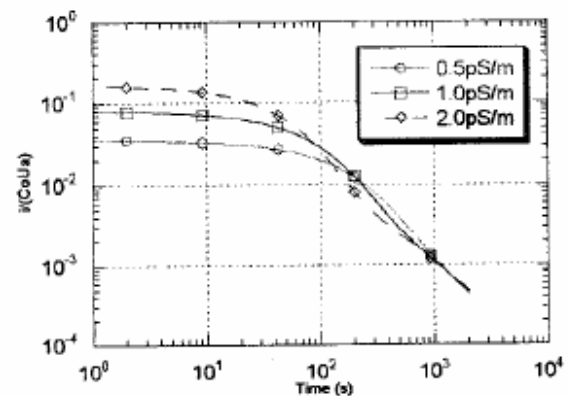


Figura 27 Variación de la corriente de depolarización en función de la conductividad [26]

Los autores partidarios del método PDC destacan que presenta resultados coherentes con otros métodos de medida de humedad lo que es lógico ya que al igual que en el resto de métodos descritos todos ellos se basan en modelar los mismos mecanismos de polarización. El equipo que se precisa es barato, aunque uno de sus principales inconvenientes es su sensibilidad al ruido eléctrico externo ya que es necesario el empleo de un pico-amperímetro el cual, en función del emplazamiento, por lo general un ambiente eléctricamente muy ruidoso, puede tener problemas con el ruido ambiente, otro inconveniente de este método es que requiere un largo tiempo para su aplicación.

2.3.2.2 Espectroscopia en el dominio de la frecuencia FDS

Para el estudio de la respuesta dieléctrica de un aislamiento en el dominio de la frecuencia es realizado un barrido discreto de frecuencias, obteniendo para cada frecuencia el factor de pérdidas dieléctricas y la capacidad del objeto de prueba.

El set-up de la prueba se realiza de la misma manera que el que es empleado para realizar una medida de factor de pérdidas dieléctricas, lo que no carece de lógica teniendo en cuenta que la única diferencia entre ambos ensayos es que la fuente de tensión tiene la capacidad de variar la frecuencia de salida.

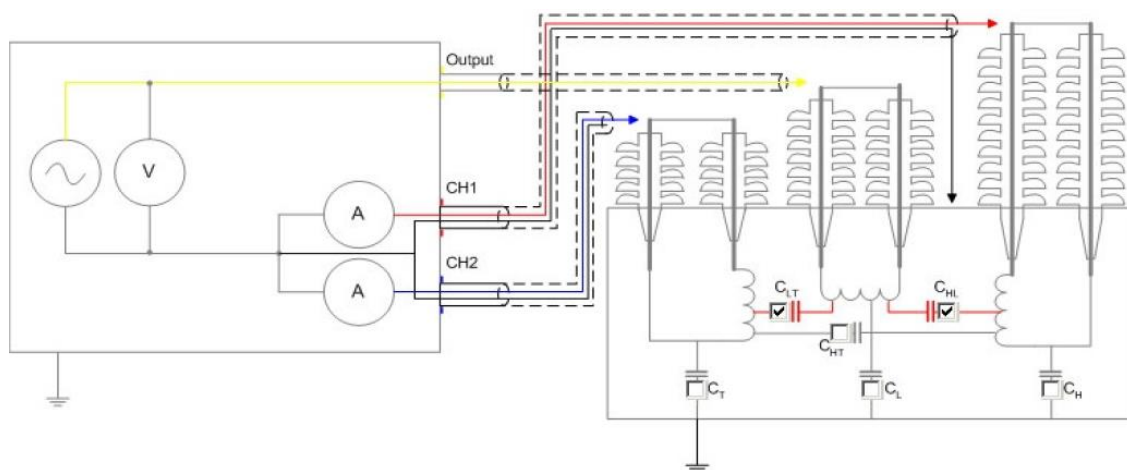


Figura 28 Setup para la media en dos canales, en este caso se obtendrá la respuesta dieléctrica del aislamiento entre AT y BT y entre AT y Terciario [Captura pantalla software Dirana 1.1 (OMICRON)]

La interpretación de los resultados se realiza en base al ajuste de las curvas obtenidas a modelos elaborados en laboratorio, en base a estos modelos realizados en laboratorio es posible determinar también las zonas de influencia de los distintos efectos en la curva que se dibuja uniendo todos los puntos muestreados, de esa forma como se observa en la figura 30 se pueden evaluar los cambios en la condición del aislamiento mediante la superposición de dos respuestas en distintos momentos. El factor de disipación representado contra la frecuencia muestra una curva típica en forma de S. Con el aumento de la humedad, la temperatura o el envejecimiento, la curva se desplaza a frecuencias más elevadas. La humedad influye sobre las áreas de alta y baja frecuencia. La parte central de la curva con el elevado gradiente refleja la conductividad del aceite. Las condiciones geométricas del aislamiento determinan la “sobreelevación” hacia el lado izquierdo del elevado gradiente.

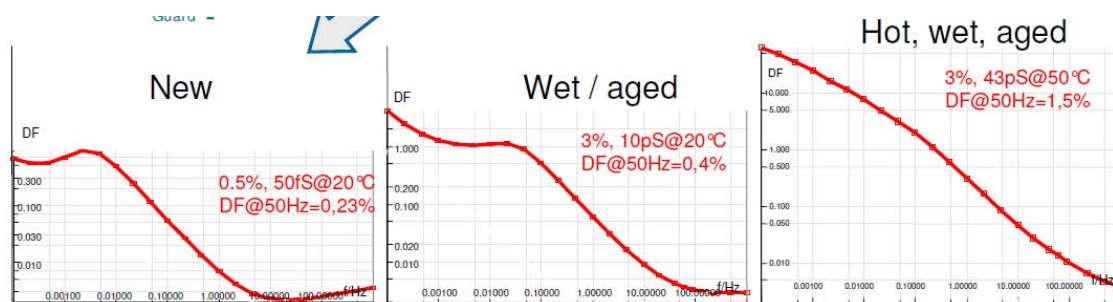


Figura 29 Sensibilidad a las variaciones en la condición del aislamiento. [27]

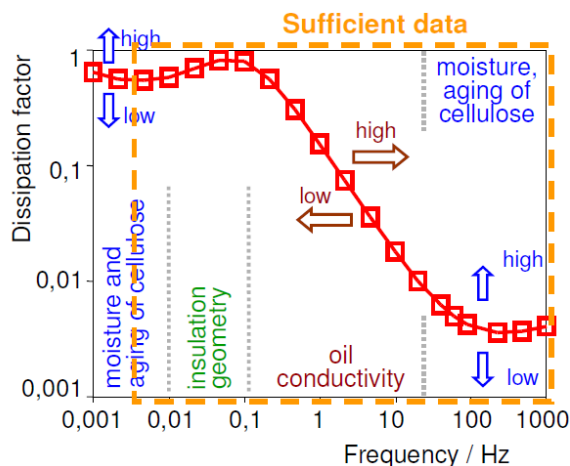


Figura 30 Zonas de influencia de los distintos efectos sobre el aislamiento. [27]

La gran ventaja que presenta el método de FDS sobre los métodos basados en el dominio del tiempo es que los modelos desarrollados en laboratorio están en un estado mucho más avanzado y en base a la definición de una serie de parámetros (conductividad, temperatura, porcentaje de dieléctrico líquido y sólido), el equipo de medida puede arrojar estimaciones numéricas de valores como el porcentaje de humedad en el aislamiento o la conductividad del aceite, si bien el problema en la práctica es lograr estimar los parámetros de porcentaje de aislamiento celulósico, porcentaje de fluido dieléctrico y porcentaje de barreras, los cuales han de ser estimados dado que es un dato habitualmente desconocido.

La figura 31 representa el flujo de información mediante el cual se realiza la evaluación de la condición de un transformador, puede ser observado que la evaluación se basa en adaptar la curva obtenida a una curva patrón simulada en base a unos parámetros conocidos en base a esta comparativa entre el resultado obtenido y patrones es posible determinar valores cuantitativos en lo relativo a conductividad o humedad en el transformador.

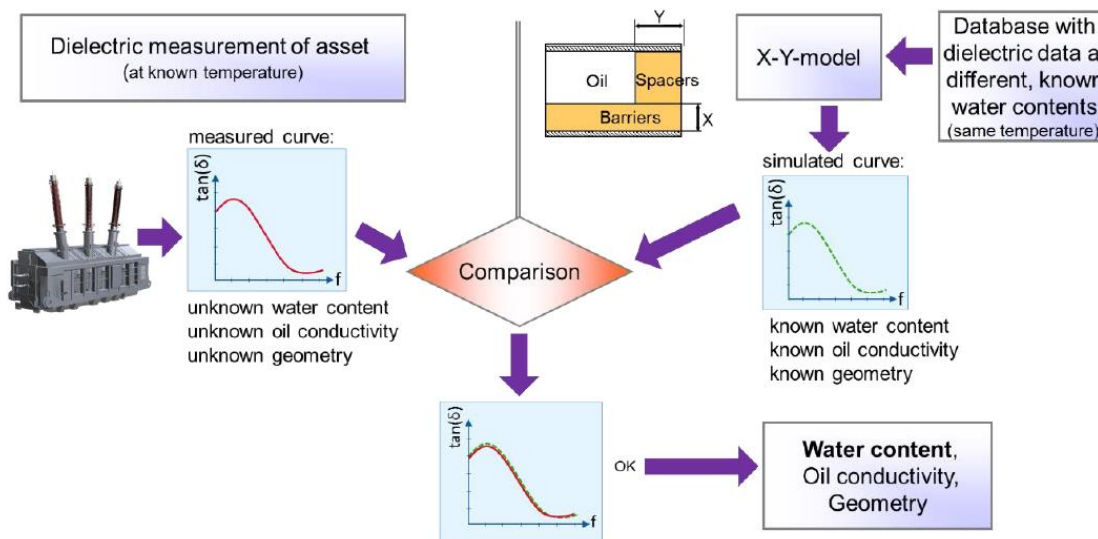


Figura 31 Diagrama de flujo de información para la obtención del valor de contenido en humedad del transformador [27]

3 La Tensión de Reabsorción

El primer trabajo en el que se plantea el método de Recovery Voltage Method (RVM) o tensión de reabsorción fue elaborado por una serie de utilities Húngaras (MVMT) y desarrollado por la universidad Budapest Technical. University (BME) a mediados de la década de los 70. El objetivo era revisar los entonces actuales métodos empleados para el diagnóstico de aislamientos de grandes transformadores de potencia con aislamientos papel-aceite, en base a ensayos de laboratorio y ensayos en transformadores reales hacer una propuesta de un método para su futura aplicación en campo. [3], [28]

3.1.1 Descripción

El ensayo de RVM se fundamenta en la aplicación de un campo eléctrico continuo durante un tiempo determinado (T) (conmutador de la Figura 33 en posición 1), cortocircuitar los terminales del aislamiento un tiempo ($T/2$) (conmutador de la Figura 33 en posición 2) y finalmente abrir el circuito y medir la evolución de la tensión en el mismo (conmutador de la Figura 33 en posición 3). Se realiza sucesivamente en un total de 14 ciclos en los cuales T es el doble que en el ciclo anterior siendo la duración en segundos de los distintos ciclos (0,1 0,2 0,4 0,8 1,6 3,2 6,4 12,8 25,6 51,2 102,4 204,8 409,6 819,2) [24], [29]

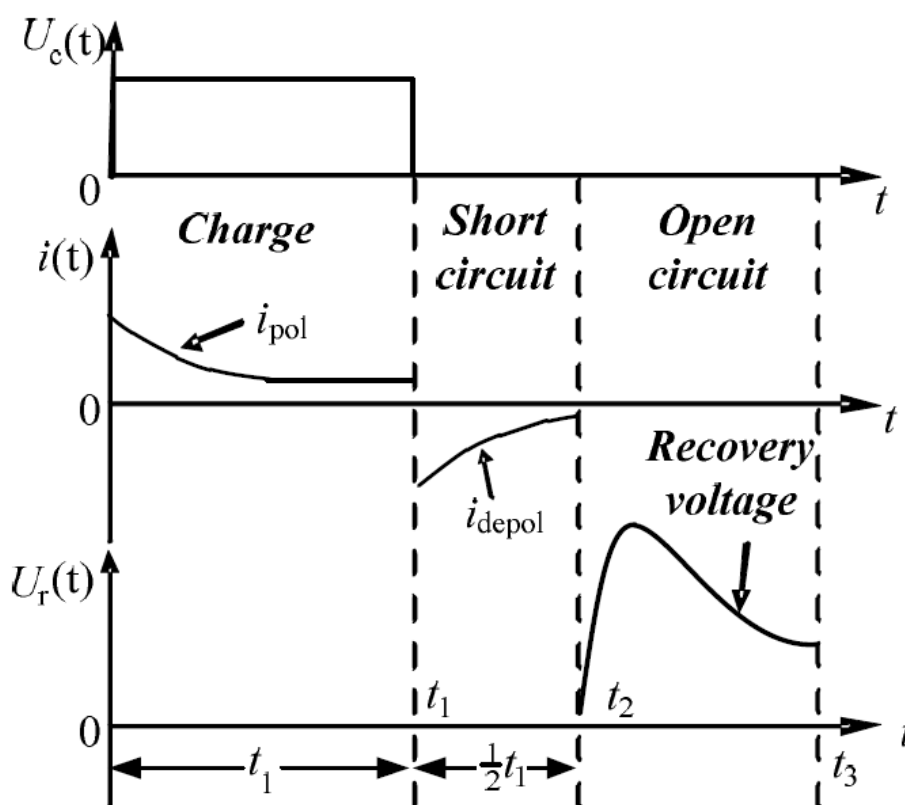


Figura 32 Durante la medida de RVM el dieléctrico es cargado con una tensión continua de valor U_0 para un tiempo $0 \leq t \leq t_1$, es cortocircuitado y aterrizado para un tiempo $t_1 \leq t \leq t_2$, y para $t > t_2$ es medida la tensión de reabsorción en condiciones de circuito abierto [25]

Con esto lo que se pretende es que los distintos mecanismos de polarización reaccionen en los distintos ciclos, estos mecanismos de polarización de la materia (los cuales son ampliamente descritos en el apartado 4.2) pueden ser modelados empleando el circuito mostrado en la figura 33, que representa el circuito extendido de Debye el cual será revisado y desarrollado en detalle en el apartado 605.1, en una primera aproximación pueden ser

descritos sus principales componentes como: la capacidad C_g la cual representa la capacidad geométrica, R_g representará la resistencia que justifica la corriente de fuga por conducción del dieléctrico, y por último las distintas ramas de polarización, con la particularidad de que su número es indeterminado y puede variar en función de las especies que componen el aislamiento y de los contaminantes presentes con distintas constantes de tiempo. Respecto al número de ramas del circuito de equivalente, es posible realizar otro enfoque, que es el empleado en el presente documento, el cual consiste en determinar un número fijo de ramas de tal manera que en función de las especies presentes en el dieléctrico tomen mayor peso unas u otras.

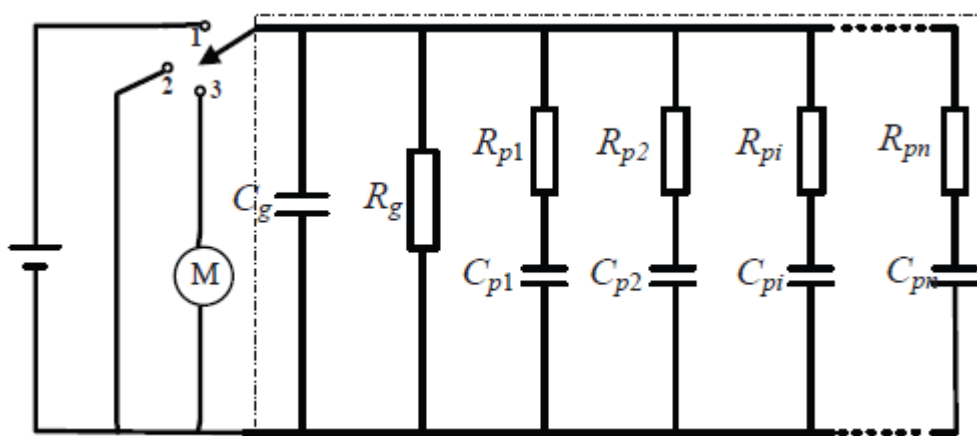


Figura 33 Circuito equivalente del circuito dieléctrico de un transformador (modelo extendido de Debye). [30]

Para una mejor comprensión del funcionamiento del circuito y de la importancia de los distintos tiempos de carga y descarga va a ser desarrollado el siguiente ejemplo, el cual con circuito compuesto por tres ramas de polarización muestra como las distintas ramas tendrán peso o no en el valor de tensión máxima alcanzada en el ciclo en función del tiempo de carga:

Se ha supuesto un circuito tres ramas de polarización con los valores indicados en la tabla 3 en el que las ramas de polarización tienen constantes de tiempo ($\tau=RC$) de 0,5sg 40sg y 500sg respectivamente.

Tabla 3 Parametros empleados para el ejemplo de tres ramas de 0,5, 40 y 500 segundos

Parámetro	RVM 1	$\tau_n=R_n*C_n$ [Sg]
C_g	2.6e-09	N/A
R_g	1000e6	
C_1	1.e-006	0,5
R_1	5e5	
C_2	1.e-006	40
R_2	4e7	
C_3	1.e-006	500
R_3	5e8	

- En el ciclo de 6,4 segundos (figura 34) la rama 1 representada por V_{c1} habrá cargado y descargado parcialmente por lo que reaccionará mientras que, un tiempo de carga de 6,4 segundos para las ramas 2 y 3 no es suficiente para que apenas los mecanismos

de polarización que representan tengan influencia, para la rama 2 representada por V_{c2} se puede observar que llega a alcanzar una pequeña carga, pero por su parte la rama 3 V_{c3} presenta una tensión residual durante todo el ciclo.

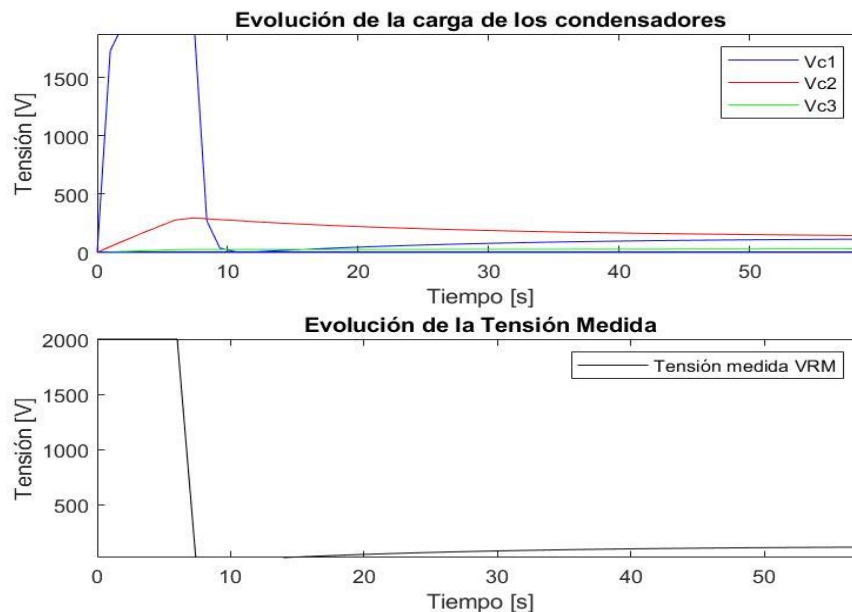


Figura 34 Evolución de la tensión en los condensadores del circuito equivalente y tensión en bornes del equipo de medida tras un tiempo de carga de 6,4 segundos.

- Para el ciclo con tiempo de carga 51,2 segundos (figura 35) el condensador de la rama 1 cuya tensión está representada como V_{c1} , durante el tiempo T de carga (51,2) habrá cargado completamente, el condensador de la rama 2 con una constante de tiempo mayor solo mostrará una carga parcial V_{c2} , al tiempo que el condensador de la rama 3 apenas habrá comenzado a cargar V_{c3} . Transcurrido el periodo de carga con una duración de $T=51,2$ segundos comienza el tiempo de descarga $T/2$ (25,6 segundos), la rama 1 habrá descargado completamente, se puede observar poco después de los 50 segundos la tensión V_{c1} es igual a cero, por lo que una vez se mida la tensión de recuperación no aportará a dicha tensión es decir esta rama en este ciclo no tiene influencia, se puede apreciar en el gráfico cómo la tensión en el condensador 1 en el momento de la medida seguirá la tensión medida en bornes del aparato de medida.

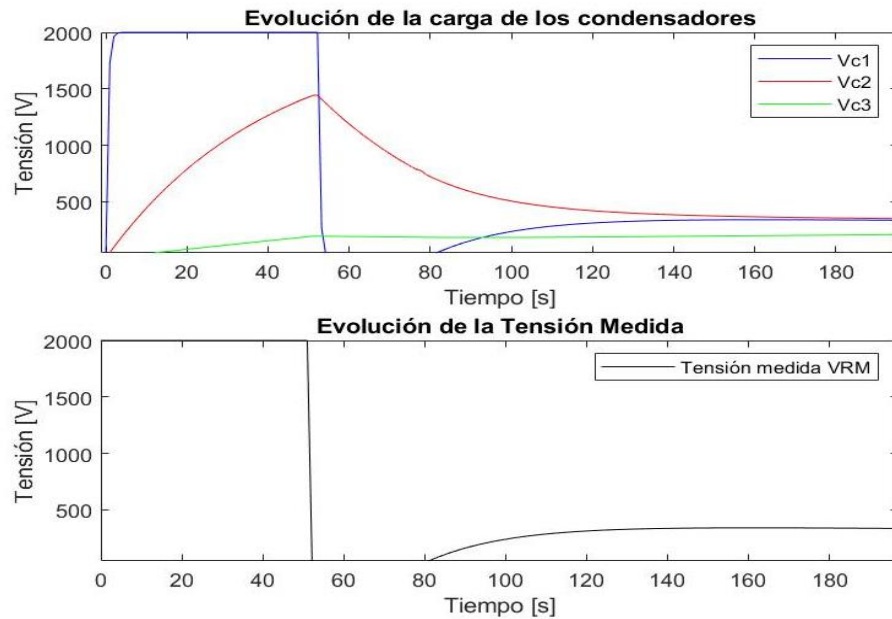


Figura 35 Evolución de la tensión en los condensadores del circuito equivalente y tensión en bornes del equipo de medida tras un tiempo de carga de 51,2 segundos.

- Para el ciclo de 819,2 segundos (figura 36) el comportamiento será análogo, las tres ramas se cargarán, las ramas 1 y 2 completamente y la rama 3 como puede ser apreciado Vc3 cargará parcialmente, sin embargo, durante la descarga de 409,6 segundos se descargarán las ramas 1 y 2 ($V_{c1}=V_{c2}=0$) por lo que se aísla el comportamiento de la rama 3 la cual en el momento de comenzar la medida su condensador Vc3 tiene una tensión de unos 712V.

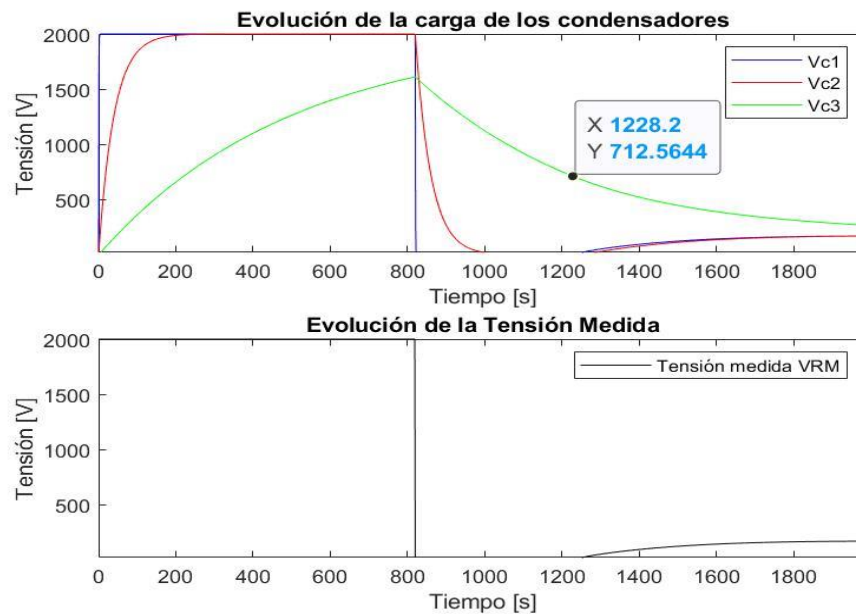


Figura 36 Evolución de la tensión en los condensadores del circuito equivalente y tensión en bornes del equipo de medida tras un tiempo de carga de 819,2 segundos.

La representación de las tensiones de pico respecto al tiempo de carga permite valorar en que tiempos se almacena carga en mayor o menor medida en los condensadores de las

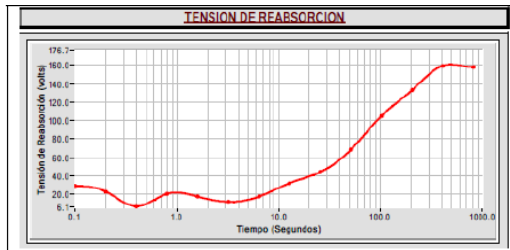


Figura 38 TP con sustancias polares presentes [Archivo personal]

Transformador que pese a tener muy buen comportamiento final, lo que denota un buen estado del papel, se pueden observar que existen ramas a tiempos bajos que aportan, lo que es indicativo de la existencia de compuestos polares como puede ser el agua que reaccionan en tiempos bajos

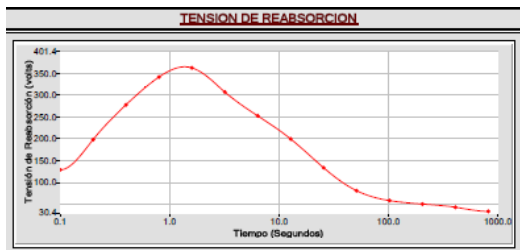


Figura 39 TP al final de su vida [Archivo personal]

Se muestra un transformador en el que existe una gran cantidad de compuestos polares (agua, productos de descomposición del papel) que predominan, en los tiempos medios se muestran procesos de polarización interfacial y los tiempos altos no presentan prácticamente actividad por lo que se estima que esta al final de su vida.

distintas ramas, pudiendo determinar si existen mecanismos que actúen en un tiempo determinado.

A continuación, se muestran ejemplos de resultados típicos de ensayo de transformadores de potencia reales:



Figura 37 TP nuevo [Archivo personal]

Transformador nuevo, y seco en el que se puede observar que no existe apenas actividad hasta los últimos ciclos, dado que predomina la polarización orientacional de grandes cadenas de polímeros que conforman el papel nuevo

3.1.2 Debilidades

Al tratarse de un ensayo de aislamiento adolece de las mismas debilidades que tienen el resto de ensayos en cuanto a las condiciones de ensayo, siendo sensible a las causas externas indicadas en la Tabla 4. [31]

Tabla 4 Posibles causas del aumento de pérdidas dieléctricas ajenas a una mala condición del aislamiento (fuentes de error)

Aislamiento	Posible causa del aumento de pérdidas dieléctricas
CH+CHL	Aparamenta o embarrados conectados
	Temperatura del aceite
	Una o más bornas de AT en mala condición
	Excesivas fugas superficiales en las bornas de AT a causa de lluvia, nieve, sal, suciedad)
	Cambio en la condición de las bornas de AT

Uso de protección de avifauna o cinta
Cuba sin poner a tierra ($Tg\delta$ negativa)
Humedad
Tracking interno o puestas a tierra no intencionadas
Contaminación
Envejecimiento
Descargas parciales
Armaduras puestas tierra entre los devanados ($Tg\delta$ negativa)

Es necesario mostrar especial precaución en lo relativo a la carga electrostática que puede presentar el transformador o el estado de magnetismo remanente dado que si el transformador no está completamente descargado los valores obtenidos cuanto menos en los primeros ciclos no serán representativos del estado del aislamiento, esto es particularmente grave desde el punto de vista de la evaluación de la humedad dado que serán estos primeros ciclos los que aportarán una mayor información a este respecto.



Figura 40 Ejemplo de respuesta RVM de un transformador cargado electrostáticamente. [Archivo personal]

Los fenómenos muy acusados de polarización interfacial pueden interferir en la respuesta de todos los otros fenómenos solapándolos, por lo que aquellos transformadores que presenten un alto contenido de compuestos polares o no polares en la interface papel aceite, y en los que por norma general los parámetros FQ presentan valores de pérdidas dieléctricas altas, la interpretación no puede ir mucho más lejos de ese punto sin poder hacerse evaluaciones precisas del estado del dieléctrico, lo cual supone un hándicap para su empleo al ofrecer resultados parciales.

El tiempo de ejecución también juega un papel importante en contra de esta prueba, que típicamente ocupará un tiempo de unas dos horas, lo que hace que su empleo como herramienta de evaluación durante el mantenimiento predictivo no sea eficiente, quedando reservada para la investigación una vez vía ensayos fisicoquímicos o vía ensayos de pérdidas dieléctricas se determine la necesidad de realizar un estudio con mayor profundidad.

Como todos los ensayos indicados para valorar el estado del aislamiento el ensayo RVM es sensible a las variaciones de temperatura, por lo que en la medida de lo posible se procurará

buscar una medida lo más próxima a los 20°C de temperatura del aceite dado que la corrección por temperatura es ciertamente imprecisa.

4 Base teórica (Física de dieléctricos).

Pese a que el documento no pretende tener una carga teoría importante y que no difiere en exceso de lo que aporta la gran variedad de textos existentes sobre la materia, sí que se estima que es conveniente en unas páginas hacer un repaso de los tipos de polarización de la materia y su dependencia con el tiempo o la frecuencia en los que se aplica el campo ya que esté apartado hará más sencilla la interpretación de los resultados experimentales.

Este apartado está basado en el texto, de los autores Avella y Duart “Física de dieléctricos” [32]

4.1 Polarización de la materia:

Para el estudio de la materia y en especial de los dieléctricos o aislantes, bajo la acción de campos eléctricos, es conveniente asimilar el comportamiento conjunto de las cargas eléctricas de sus átomos y moléculas al de entidades más sencillas que son los dipolos. Los momentos dipolares inducidos por el campo eléctrico están relacionados con éste por medio de la magnitud microscópica denominada polarizabilidad. La polarización, o momento dipolar por unidad de volumen, del dieléctrico tiene importantes consecuencias, entre ellas la disminución del campo eléctrico en el interior de un dieléctrico debido fundamentalmente a la presencia de cargas superficiales inducidas por el campo. Desde el punto de vista macroscópico, estos efectos se pueden describir más convenientemente mediante la introducción del concepto constante dieléctrica del aislante.

4.1.1 Concepto de dipolo y múltiplo

Dipolo eléctrico: Agrupación de dos cargas puntuales iguales y de signo opuesto separadas por una cierta distancia, como norma general el orden de dimensiones atómicas, su comportamiento eléctrico viene determinado básicamente por el **momento dipolar, μ** . [32]

$$\mu = q \cdot d \quad (3)$$

$q \rightarrow$ Valor absoluto de una de las cargas eléctricas

$d \rightarrow$ Vector distancia dirigido desde la carga negativa a la positiva

En muchos casos las agrupaciones de carga que constituyen la materia, cuando se encuentra en presencia de un campo eléctrico, se comportan de forma aproximada a como lo harían los dipolos, así podemos reducir el comportamiento de los medios materiales al estudio del comportamiento de un dipolo con otros vecinos o con campos eléctricos alternos.

4.2 Mecanismos de polarización de la materia

Cuando un material conductor está sometido a un campo eléctrico E_0 existe el llamado efecto de inducción de carga, según el cual los electrones libres del metal se desplazan en la dirección opuesta al campo. Como consecuencia de ello, resulta una acumulación de carga positiva y negativa en zonas opuestas de la superficie del conductor, originando un campo eléctrico E tal que compensa el campo eléctrico E_0 , el campo eléctrico en el interior del conductor es nulo, se denomina *apantallamiento de campo* en el interior de un conductor.

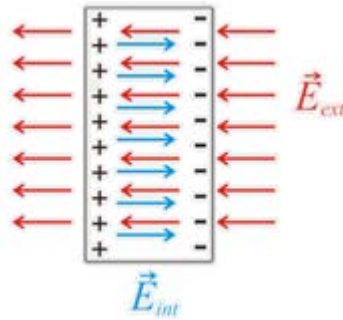


Figura 41 Apantallamiento del campo eléctrico en el interior de un conductor [33]

Aplicando este razonamiento a materiales dieléctricos (aquellos cuya densidad de carga libre es prácticamente nula) el efecto que produce el campo eléctrico es prácticamente similar, aunque el fenómeno se desarrolla a escala atómica.

EJEMPLO:

Supongamos un condensador plano en el vacío sin efecto borde.

Carga = Q

Diferencia de potencial = V_0

La capacidad será consecuentemente:

$$C_0 = \frac{Q}{V_0} \quad (4)$$

Suponiendo la carga constante, introduciremos un bloque de algún dieléctrico (cristal, aceite, mica ...), el potencial disminuirá a un valor V el cual depende del dieléctrico empleado y consecuentemente la capacidad aumentará al ser

$$C = \frac{Q}{V} \quad (5)$$

Con lo que tenemos que:

$$V < V_0 \quad (6)$$

$$C > C_0 \quad (7)$$

Este resultado se puede interpretar de la siguiente manera, una disminución del campo eléctrico desde un valor $E_0 = V_0/d$ hasta un valor $E = V/d$ causado por la presencia de aislante, lo que nos permite observar un apantallamiento parcial.

Para dar explicación a este hecho introduciremos el fenómeno que da nombre a este epígrafe que la *polarización de la materia*. La materia está formada por agrupaciones de carga (átomos, moléculas, iones) distribuidas de manera que el momento dipolar medio es nulo, ojo hay que aclarar que no es que las moléculas no tengan momento dipolar individual, lo único que ocurre es que en estado de agregación unos dipolos compensan otros siendo esta la causa del momento dipolar nulo.

La presencia de un campo eléctrico externo altera en parte esta situación, y los campos eléctricos representan siempre una pequeña perturbación de los campos eléctricos inter e intraatómicos, lo que origina un desplazamiento relativo de las cargas atómicas positivas y negativas en direcciones opuestas originándose un momento dipolar inducido μ_{ind} como

consecuencia de la aplicación del campo, este momento obviamente tiene una orientación preferencial respecto del campo.

El estado de polarización de un dieléctrico se define mediante una magnitud macroscópica denominada *vector de polarización* que se define como:

$$\mathbf{P} = N \langle \boldsymbol{\mu}_{ind} \rangle \quad (8)$$

$N \rightarrow$ Numero de moléculas por unidad de volumen de material dieléctrico.

La densidad de carga de polarización de volumen Q_b , y de superficie, σ_b , vienen dadas en función del vector de polarización por:

$$Q_b = -\nabla \cdot \mathbf{P} \quad (9)$$

$$\sigma_b = \mathbf{P} \cdot \mathbf{n} \quad (10)$$

Donde el símbolo ∇ representa la divergencia y \mathbf{n} es el vector unitario normal a la superficie en cada punto, lo que en nuestro ejemplo se traduce en que al ser un dieléctrico de polarización uniforme $Q_b = -\nabla \cdot \mathbf{P} = 0$ para todos los puntos del interior. Por el contrario, existe una densidad de carga superficial de signo opuesto en cada una de las superficies del dieléctrico igual a más menos \mathbf{P} . Esta carga superficial es la responsable de la disminución del campo eléctrico en el interior del dieléctrico, debido al campo \mathbf{E}_b originado por estas cargas.

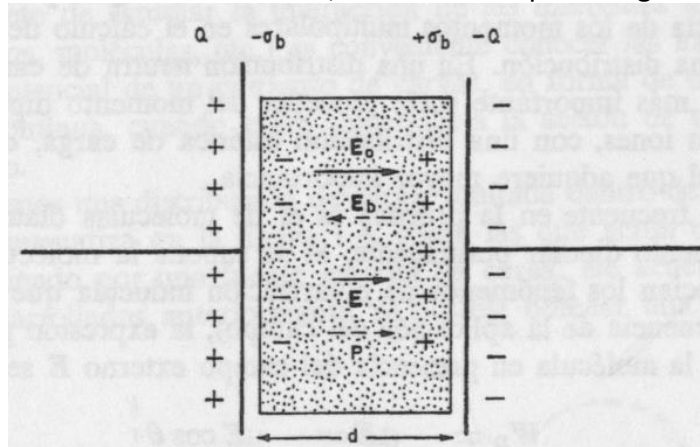


Figura 42 Apantallamiento parcial del campo en el interior de un material dieléctrico. E_0 representa el campo sin dieléctrico y E es el campo resultante después de introducir el dieléctrico. [32]

En estas condiciones las ecuaciones electrostáticas desarrolladas en el vacío para el campo eléctrico siguen manteniendo la misma forma que en medios dieléctricos cambiando únicamente la constante dieléctrica del vacío ϵ_0 por la llamada *constante dieléctrica o permitividad del medio* ϵ , el cociente entre ambas se denomina *constante dieléctrica relativa* ϵ_r , coincide precisamente con el aumento de la capacidad y con la disminución de la tensión.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{C}{C_0} = \frac{V_0}{V} \quad (11)$$

4.2.1.1 Polarizabilidad

Se define la polarizabilidad como la relación entre el momento dipolar inducido y el campo que actúa sobre las moléculas. En una primera aproximación, se encuentra que a menudo es suficiente establecer la relación entre las componentes $\boldsymbol{\mu}_{ind}$ y \mathbf{E} se puede hacer un desarrollo de series de potencias, pero con campos eléctricos normales con los términos de primer orden es suficiente, así que, en una aproximación lineal, se puede escribir así:

$$\langle \mu_{ind} \rangle_i = \sum_j \alpha_{ij} E_j \quad (12)$$

Donde el coeficiente α_{ij} se denomina polarizabilidad en la dirección i cuando se aplica campo eléctrico en la dirección j , como es lógico estos coeficientes dependen del material. El conjunto de coeficientes α_{ij} forman el llamado *tensor de polarizabilidad*.

Tradicionalmente se distinguen tres mecanismos básicos que pueden contribuir de forma aislada o conjuntamente a la polarización:

1. *Polarización electrónica*: según la cual la nube de electrones que rodea los núcleos de los átomos se desplaza en la dirección opuesta al campo eléctrico produciendo un pequeño dipolo con carga positiva del núcleo.
2. *Polarización atómica o iónica*: en la que los iones de distinto signo que componen la molécula se desplazan en direcciones opuestas desde sus posiciones de equilibrio dando lugar a un momento dipolar inducido.
3. *Polarización orientacional*: producida por la orientación parcial de los dipolos permanentes bajo la presencia del campo.

A los dos primeros mecanismos, con bastantes similitudes entre ambos se les conoce como mecanismos de polarización inducida.

4.2.2 Polarización inducida (electrónica e iónica) [32]

El fenómeno de polarización electrónica se debe a la deformación elástica de la nube de electrones que orbita alrededor de los átomos, al tiempo que la polarización iónica está causada por el desplazamiento elástico de todos o parte de los iones que componen la molécula. En ambos casos, la aplicación de campo eléctrico induce un dipolo, su respuesta bajo la acción del campo eléctrico puede ser considerada en la práctica como instantáneo. Este hecho hace que ambos fenómenos de polarización inducida aparezcan incluso en situaciones en las que los campos eléctricos varíen rápidamente con el tiempo. La aplicación de campos eléctricos alternos de frecuencia elevada origina adicionalmente fenómenos de resonancia ya que ambos procesos son de naturaleza elástica.

La polarizabilidad electrónica se debe al desplazamiento de la nube de electrones de los átomos e iones en relación al núcleo una vez aplicado un campo \mathbf{E} . Esto ocasiona que el c.d.g (Centro de Gravedad) de la carga con polaridad positiva se desplace con respecto al c.d.g de la carga con polaridad negativa, esto origina un momento dipolar inducido, μ_{ind} .

Se puede hacer un cálculo aproximado de la polarizabilidad electrónica en el caso de átomos o iones esféricos considerando que el desplazamiento de los electrones bajo la acción del campo eléctrico se realiza de forma conjunta y sin que exista deformación de la nube electrónica. Esta aproximación puede ser válida para átomos o iones con la capa s totalmente ocupada, ya que en este caso los electrones, incluso los más externos, tienen una energía de enlace relativamente elevada. Supondremos además que la carga de los electrones ($-Q$) está uniformemente repartida en una esfera de radio R .

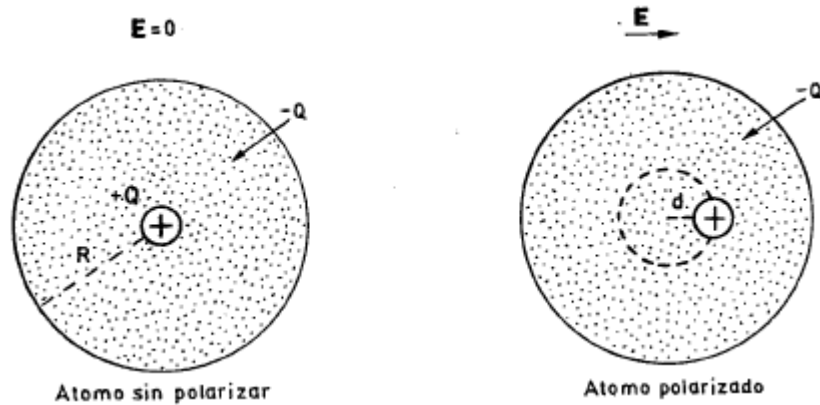


Figura 43 Modelo de polarización electrónica para átomos esféricos [32]

En la figura anterior se ha representado un esquema de distribución de las cargas antes de y después de aplicar un campo eléctrico externo E sobre un átomo aislado. En ausencia de campo aplicado el c.d.g de la carga negativa coincide con el de la carga positiva por lo que el momento dipolar es nulo. La presencia de campo produce un desplazamiento relativo de los c.d.g. de ambas cargas hasta que se alcanza una cierta distancia de equilibrio d . El valor de d vendrá determinado por el equilibrio de las fuerzas de campo, QE , y la fuerza de atracción entre el núcleo y las cargas negativas. De acuerdo con el teorema de Gauss, solo una fracción de estas cargas, la contenida dentro de la esfera de radio d , es decir $q=Q(d/R)^3$, es la que actúa sobre el núcleo, ya que el resto de la distribución produce una fuerza neta nula.

De acuerdo con el razonamiento anterior desarrollaremos la siguiente demostración:

$$QE = \frac{Q \cdot q}{4\pi\epsilon_0 d^2} = \frac{Q^2 d}{4\pi\epsilon_0 R^3} \quad (13)$$

De donde resulta:

$$d = \frac{4\pi\epsilon_0 R^3}{Q} E \quad (14)$$

El momento dipolar inducido valdrá:

$$\mu_{ind} = Q \cdot d = 4\pi\epsilon_0 R^3 E \quad (15)$$

Y la polarizabilidad correspondiente:

$$\alpha_e = 4\pi\epsilon_0 R^3 \quad (16)$$

Se llega así a una expresión para la polarizabilidad electrónica, la cual resulta ser proporcional al cubo del radio de los átomos o iones que componen una sustancia. El aumento de la polarizabilidad con el radio atómico o iónico que predice la ecuación es natural puesto que, en términos generales, a medida que están más alejados del núcleo, los electrones tienen un enlace más débil, por lo que presentan mayor polarización.

Tabla 5 Polarizabilidad electrónica de algunos átomos o iones (expresada en 10^{-41} F.m^2)¹

He	2,22	Li+	0,22		
Ne	4,33	Na+	2,44	F-	9,45
Ar	18,0	K+	10,8	Cl-	33,3
Kr	27,3	Rb+	16,7	Br-	45,9
Xe	44,3	Cs+	26,9	I-	68,5

Se observa en la tabla anterior que los iones negativos poseen una polarizabilidad más alta que los correspondientes átomos neutros, y en estos a su vez la polarizabilidad es mayor que en los correspondientes iones positivos. La causa es la disminución del radio al pasar de ion negativo a neutro y de neutro a positivo.

Tomando distancia y alejándonos vemos que la siguiente unidad es la molécula aislada en la que se puede dar el fenómeno de polarizabilidad iónica en moléculas aisladas, la aplicación de un campo eléctrico según el eje de la molécula modifica la distancia d de equilibrio de los iones, desplazando el ion positivo en la dirección del campo y el negativo en la dirección opuesta, hasta que alcanza una nueva distancia de equilibrio, $d + \Delta d$. Este hecho produce una variación del momento dipolar permanente, $\mu_p = Qd$, en una cantidad $\Delta\mu_p$ dada por $\Delta\mu_p = Q\Delta d$

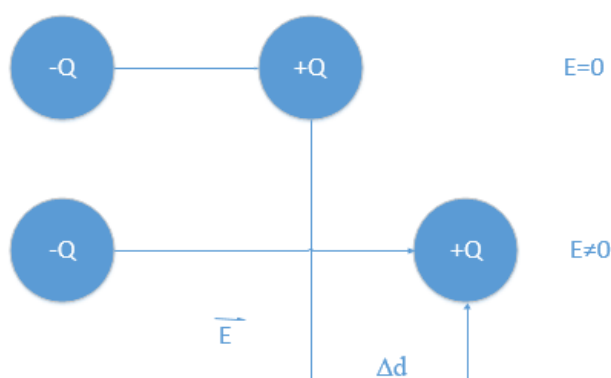


Figura 44 Modelo de polarización iónica de una molécula diatómica. [32]

La polarización iónica se asocia a la alteración del momento dipolar permanente que forman las parejas de iones de signo contrario dentro de la estructura molecular. Yendo al caso general, esta alteración podría no consistir solo en el cambio de la distancia (d) de equilibrio (distancia de enlaces) sino también en un cambio de ángulo de enlace. Este último efecto sólo se puede presentar en moléculas poliatómicas formadas por más de dos iones (CO_2 , H_2O , etc).

Al tratarse de un fenómeno elástico podemos suponer el enlace como un muelle de constante k , de esa manera igualaremos la fuerza del muelle a la que se obtiene de aplicar el campo E .

$$Q \cdot E = k \cdot \Delta d \quad (17)$$

Dónde:

¹ Datos tomados de A.J. Dekker; Solid State Physics, Ed: McMillan, Ltd Co, Londres 1965

$$\Delta d = \frac{Q \cdot E}{k} \quad (18)$$

Y el momento dipolar inducido es:

$$\mu_{ind} = \Delta \mu_p = Q \cdot \Delta d = Q^2 E/k \quad (19)$$

La polarizabilidad inducida es:

$$\alpha_i = \frac{Q^2}{k} \quad (20)$$

Y si la molécula está compuesta por n iones el efecto es aditivo

$$\alpha_i = \sum_n \frac{Q_n^2}{k_n} \quad (21)$$

En moléculas poliatómicas formadas por más de dos iones, existe una polarizabilidad iónica asociada a cada uno de los enlaces existentes en la molécula. Es más, el desplazamiento de los iones puede producir también un cambio de ángulo de enlace formado por tres iones, produciendo a su vez un cambio de momento dipolar asociado a un grupo de átomos.

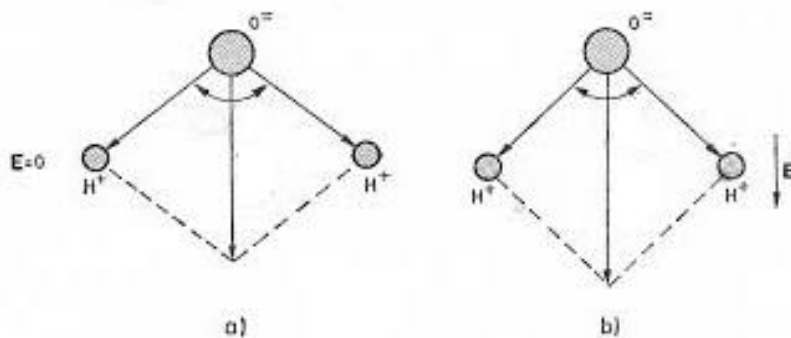


Figura 45 a) Estructura de una molécula de agua, b) Cambio de ángulo del enlace al aplicar un campo [32]

Tanto la polarización iónica como la electrónica, son fenómenos de tipo elástico, de forma que el sistema vuelve a su estado inicial, prácticamente de forma instantánea, cuando desaparece el campo eléctrico, debido a la fuerza de recuperación de enlace que hace unas líneas la asimilamos a un muelle. En ambos procesos de polarización apenas existe disipación de energía, ya que la energía absorbida por el sistema se reintegra casi por completo a la fuente después de desconectar el campo eléctrico. Al tratarse de un fenómeno elástico, la temperatura del dieléctrico tiene una influencia pequeña en el valor de la polarizabilidad, salvo cuando se alcanzan temperaturas que puedan modificar la naturaleza del enlace.

Visto esto como el pintor que ha terminado su obra y se aleja para ver el resultado con perspectiva hemos pasado por el átomo, el ion y la molécula ahora vamos a analizar lo que ocurre en una red que compone un sólido, aunque como podrá apreciarse cualitativamente

el comportamiento de los sólidos es similar al de las moléculas aisladas que forman un líquido o un gas.

En sólidos formados por iones de diferente tipo (heteropolares) cabe esperar también una contribución a la polarizabilidad debido al desplazamiento en direcciones opuestas de los iones de signo diferente al aplicar un campo eléctrico, en ausencia de campo los momentos dipolares inherentes a cada pareja de iones se compensan entre sí de forma que el momento dipolar medio de unidad de volumen es cero. Al aplicar un campo eléctrico el desplazamiento relativo de los iones da lugar a un aumento de los dipolos dirigidos en la dirección del campo y a una disminución de los dipolos que tiene la dirección opuesta. En consecuencia, el momento dipolar neto por unidad de volumen es diferente de cero.

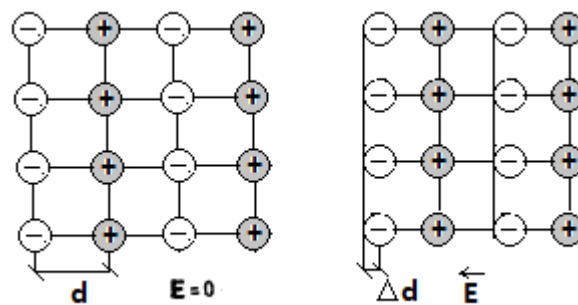
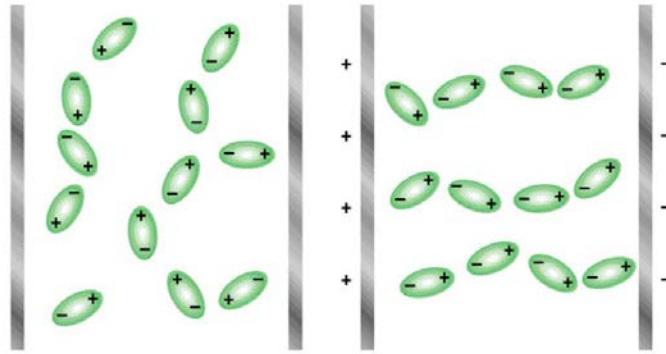


Figura 46 Modelo de polarización iónica en una red cúbica [32]

Como se ha indicado es posible generalizar las conclusiones obtenidas para los iones y diremos que Δd es proporcional al campo eléctrico que actúa sobre los iones.

4.2.3 Polarización orientacional

La orientación de los dipolos permanentes bajo la acción de un campo externo aplicado es una de las mayores contribuciones de la polarizabilidad en un gran número de materiales. La importancia de este mecanismo de polarización es todavía mayor si se tiene en cuenta que la polarizabilidad orientacional determina la respuesta dieléctrica en muchas sustancias en la región de baja frecuencia cuando se aplican campos eléctricos alternos. Este mecanismo se presenta únicamente cuando las moléculas poseen momento dipolar permanente. Así cuando las moléculas polares se encuentran en equilibrio térmico a una cierta temperatura, el valor medio del momento dipolar, en cualquier instante, es nulo ya que la agitación térmica impide que exista una orientación preferencial en el momento dipolar. La presencia de un campo eléctrico altera esta situación ya que los dipolos tienden a orientarse en la dirección del campo hacia una posición de energía potencial mínima. Simultáneamente la agitación térmica se opone, mediante colisiones, a que exista una orientación preferencial. Después de un cierto tiempo de aplicación del campo se alcanza una posición de equilibrio, en la que cualquier instante existirá un mayor número de moléculas orientadas en una dirección próxima al campo que en la dirección opuesta, evidentemente llegada esta situación el valor del momento dipolar medio va a ser distinto de cero.



Fuente: Archivo: Dielektrikum polarni.svg- <https://es.wikipedia.org>

Figura 47 Polarización orientacional

Este tipo de polarización es denominada como, polarización orientacional, se presenta en aquellos sistemas en los que existan dipolos permanentes con libertad de rotación. En los sólidos las moléculas generalmente no tienen libertad de rotación, sin embargo, existen algunos sólidos en los que es posible la rotación de algunos grupos radicales polares (grupos OH, CH₃, etc), en la figura 48 se muestra la estructura polimérica de la resina empleada en la fabricación de bornas RIP, en la que abundan los grupos CH₃.

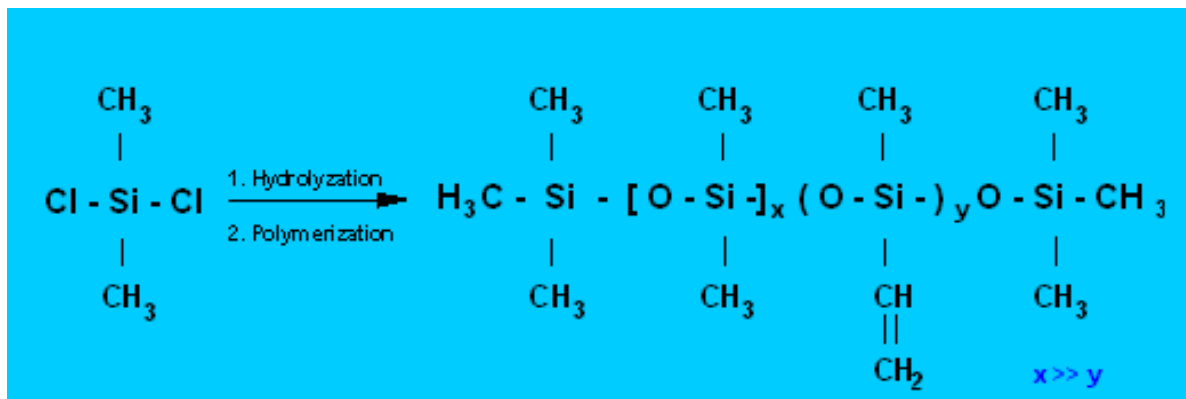
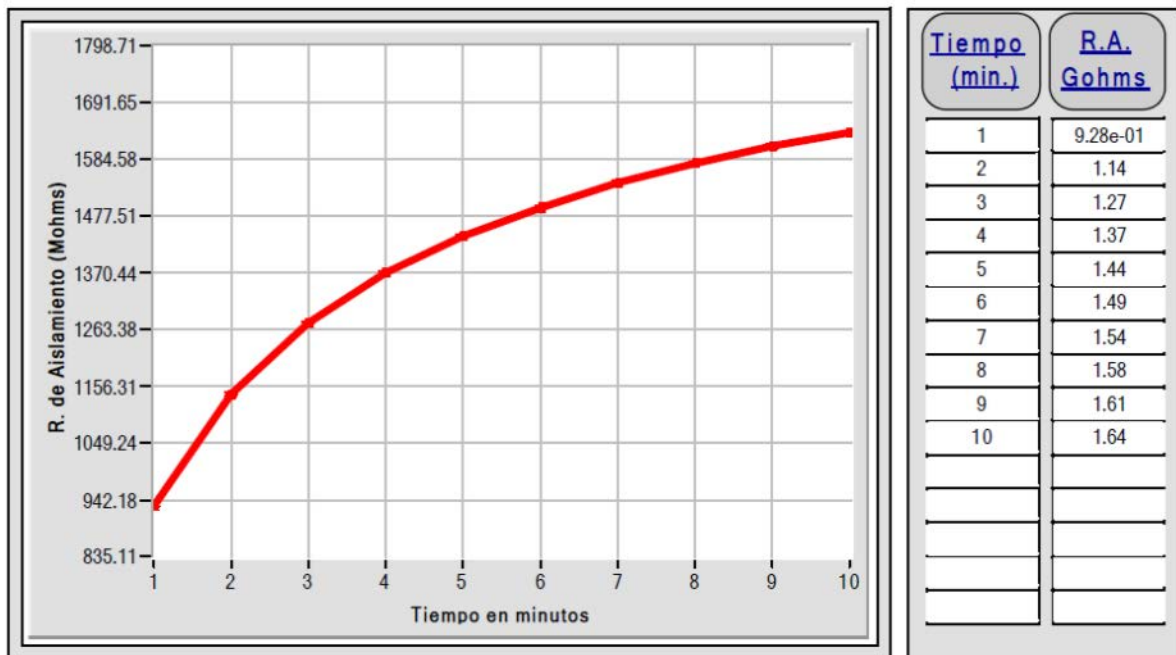


Figura 48 Estructura del polímero de silicona utilizado en bornas RIP [HSP Hochspannungsgeräte GmbH]

En el caso de campos eléctricos estáticos la polarizabilidad orientacional suele ser la que da una mayor contribución a la polarizabilidad total, ello es debido al mayor momento dipolar permanente que es generalmente bastante elevado (es el resultado de multiplicar Q por varios Angstroms)

A diferencia de otros mecanismos de polarización electrónica o iónica, la polarización orientacional depende fuertemente de la temperatura del sistema. Por otra parte, al formar el conjunto de moléculas polares un sistema en equilibrio dinámico, el equilibrio se alcanzará después de un cierto tiempo de aplicación del campo eléctrico. Este hecho contrasta con la polarización electrónica o atómica en las que el equilibrio se alcanza prácticamente de forma instantánea.

En la figura 49 se observa el fenómeno de polarización de un aislamiento papel-aceite, en el que se aplica una tensión continua de 200V, se observa cómo poco a poco el aislamiento aumenta con el tiempo de exposición al campo eléctrico, observar un aislamiento con la capacidad de polarizar es buen síntoma.



c:\SAGEN_WIN\MisEnsayos\Beniferri_LCL\IRATRPSIEMEId55260.7

- 2/2 -

Figura 49 Curva de polarización obtenida durante un ensayo de resistencia de aislamiento. [archivo personal]

Observando la curva de polarización vemos que es pese a ser un material compuesto cumple con las premisas de Langevin que permite obtener la relación entre el valor medio de la componente del momento dipolar en la dirección del campo eléctrico $\langle \mu_E \rangle$ y el valor del momento dipolar permanente de la molécula μ_p .

De acuerdo a esto el valor de μ_E viene dado por:

$$\langle \mu_E \rangle \cong \frac{\mu_p^2}{3kT} E \quad (19)$$

Y de la misma manera podemos definir la polarizabilidad como

$$\alpha_{or} \cong \frac{\mu_p^2}{3kT} \quad (20)$$

Lo que se conoce como la *Ley de Curie* para los dieléctricos, la expresión de Langevin es aplicable a sólidos con la salvedad de aquellos que son sustancias puras en formas monocristalinas, el resto presentan defectos de estructura, tal es el caso de los materiales empleados como aislantes: cerámicos, vidrios amorfos, polímeros... en los que existen cargas que pueden saltar entre dos posiciones equivalentes de energía potencial presentan una respuesta del tipo Devye, la cual es bastante similar a la que ofrecen los líquidos y gases de moléculas polares orientables.

4.2.4 Relación entre la polarizabilidad y la constante dieléctrica

Hasta el momento se han visto los mecanismos de polarización que actúan en la materia en presencia de un campo eléctrico, teniendo en cuenta su carácter vectorial podemos concluir que la polarizabilidad α viene determinada por:

$$\alpha = \alpha_{or} + \alpha_i + \alpha_e \quad (20)$$

Dónde:

α_{or} = contribución debida a la orientación de las moléculas; implica la presencia de momentos dipolares permanentes

α_{or} = contribución iónica

α_{or} = contribución electrónica

La polarizabilidad, debido a su propia definición, es una magnitud de tipo microscópico, es decir, se refiere a los componentes microscópicos de la materia: electrones, iones, dipolos, etc. Por el contrario, el vector polarización \mathbf{P} fue definido como un valor medio del momento dipolar inducido en la dirección del campo en un volumen unidad. La relación entre α y \mathbf{P} vendrá dada por:

$$\mathbf{P} = N \langle \mu_E \rangle = N \alpha \mathbf{E}_{loc} \quad (21)$$

Donde N es el número de moléculas o átomos que contribuyen a la polarización por unidad de volumen y \mathbf{E}_{loc} es el campo eléctrico que actúa en cada una de las agrupaciones de carga.

Para obtener una relación entre la constante dieléctrica, ϵ , y la polarizabilidad, generalmente se admite una relación de proporcionalidad entre el vector polarización y el campo eléctrico macroscópico en el interior del dieléctrico, \mathbf{E} :

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E} \quad (22)$$

Donde χ es la susceptibilidad dieléctrica, esta expresión presupone que el medio es lineal y que se polariza isotrópicamente en todas las direcciones. Sin embargo, éste no es el caso general, y de hecho una proporcionalidad de tipo escalar es válida solamente para gases, líquidos, sólidos amorfos y cristales cúbicos. En cristales con simetría no cúbica es necesario establecer una relación entre cada componente del vector polarización \mathbf{P}_i y las componentes del campo eléctrico, \mathbf{E}_j .

$$\mathbf{P}_i = \epsilon_0 \chi_{ij} \mathbf{E}_j \quad (23)$$

χ_{ij} representa las componentes del tensor susceptibilidad dieléctrica.

Para los propósitos de la teoría básica de los dieléctricos es suficiente la aproximación escalar dada por la ecuación $\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E}$. Si se combina esta relación con la ecuación de definición del vector desplazamiento eléctrico, \mathbf{D} , se obtiene:

$$\epsilon_0 (1 + \chi) = \epsilon \quad (24)$$

Para la constante dieléctrica relativa, ϵ_r , se tiene:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 + \chi \quad (25)$$

Y está asociada la disminución relativa del campo eléctrico en el interior de un material dieléctrico.

Tabla 6 Constante dieléctrica relativa de sustancias típicas

Material	Constante $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$
Vacio	1
Aire	1,000549

Mica	4,4
Papel	2
Porcelana	7
Aceite	2,2
Silicona	2,75
(liquida)	
Agua 20°C	80

La relación entre las magnitudes macroscópicas, ϵ o χ y las magnitudes microscópicas N y α vienen dadas por la relación:

$$P = \epsilon_0 \chi E = (\epsilon - \epsilon_0) E = N \alpha E_{loc} \quad (26)$$

Por esta razón, cuando se aplican campos eléctricos alternos de frecuencia suficientemente alta (en la mayor parte de los casos, por encima de las frecuencias de las microondas) sólo la polarizabilidad de los dipolos inducidos contribuye a la polarización del dieléctrico, ya que los dipolos permanentes no son capaces de seguir las variaciones rápidas del campo.

4.3 Dieléctricos en campos variables con el tiempo. [32]

Hasta ahora hemos visto los fenómenos que ocurren cuando aplicamos un campo estático y como ha sido posible apreciar no todos los efectos son inmediatos, si a un dieléctrico le aplicamos un campo eléctrico variable en el tiempo puede ocurrir que si este varía con la celeridad adecuada ciertos fenómenos no se den o se den fenómenos de resonancia, bien es cierto que para nuestro ámbito los fenómenos de resonancia están fuera de nuestro alcance ya que estos requieren de frecuencias muy altas a las que ni nos acercaremos. La polarizabilidad total de una molécula es una magnitud que depende de la frecuencia del campo eléctrico aplicado. Ello es debido a los diferentes mecanismos de polarización. Así, cuando se aplica sobre un dieléctrico un campo eléctrico alterno de frecuencia superior a las microondas, la polarización orientacional no contribuye debido a la incapacidad de los dipolos de oscilar con la frecuencia del campo. El fenómeno es de carácter general, de forma que para un campo eléctrico que varía de forma abrupta o rápida se dice que el sistema necesita un *tiempo de respuesta*, más o menos largo, dependiendo de las características de polarización, para adaptarse a la nueva situación.

El estudio del comportamiento de los materiales dieléctricos sometidos a un campo eléctrico alterno, es de interés bajo un punto de vista básico, debido a que estos análisis facilitan la obtención de una mayor información acerca de los mecanismos de polarización. Cuando un conductor es sometido a la acción de un campo E , a través del material conductor circula una corriente cuya densidad, J_c , se describe como:

$$J_c = \sigma_c E \quad (27)$$

Donde σ_c representa la conductividad propia del material.

En la mayor parte de los materiales aislantes, la corriente a través de portadores libres (corriente de conducción) es baja debido a que su conductividad σ_c es varios órdenes de magnitud inferior a la de semiconductor o un metal. En los dieléctricos, por el contrario, cuando son aplicados campos variables con el tiempo se da una nueva forma de conducción que, en base a las ecuaciones de Maxwell, se define como:

$$J_d = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (27)$$

Si se dan corrientes de desplazamiento y de conducción, se define la densidad de corriente, J , como:

$$J = J_c + J_d = \sigma_c \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (28)$$

Es posible expresar el valor de J_d en función del vector de polarización \mathbf{P} , empleando la ecuación $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$

$$J_d = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) = \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} \quad (29)$$

El primer término de la ecuación (29) únicamente es función del campo eléctrico en el tiempo y a su vez muestra independencia del material y sus características. El segundo término de la ecuación se debe en exclusiva a la polarización del dieléctrico y es función del material, por lo que diferirá en función a los mecanismos de polarización sensibles al campo eléctrico que sea aplicado.

4.3.1 Función de respuesta dieléctrica [32]

Con objeto de estudiar de forma completamente general la respuesta de un dieléctrico, ante un campo eléctrico $\mathbf{E} = \mathbf{E}(t)$, variable con el tiempo, conviene precisar la naturaleza de la función $\mathbf{D}(t)$ correspondiente a dicho campo, definida a través de la relación:

$$\mathbf{D}(t) = \epsilon(t) \mathbf{E}(t) \quad (30)$$

Donde $\epsilon(t)$ es la constante dieléctrica para un instante t de un determinado material.

La respuesta a un estímulo se divide en dos términos: un término que consideraremos para todos los efectos como *instantáneo* en base a los mecanismos de polarización inducida (iónica y electrónica), caracterizado por la constante dieléctrica instantánea ϵ_∞ , y un segundo término más lento (polarización retardada) que responde a la polarización orientacional, cuya constante es ϵ_s . Es preciso tener en cuenta, sin embargo, que la asociación de ambos términos *el instantáneo y lento* a un mecanismo determinado de polarización será función de la rapidez en la variación tipo escalón del campo eléctrico aplicado. Un campo cualquiera variable con el tiempo, $\mathbf{E}(t)$, aplicado desde el instante $t = -\infty$ es posible descomponerlo en una agregación de pulsos rectangulares, en base al principio de superposición, el vector $\mathbf{D}(t)$ será el resultado de la integración de todas contribuciones de los pulsos predecesores.

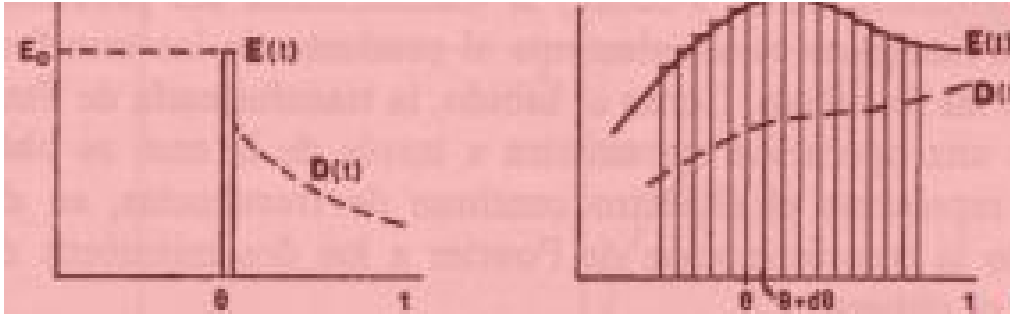


Figura 50 Respuesta ante un pulso siguiendo una señal cualquiera [32]

$$D(t) = \varepsilon_{\infty} E(t) + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \int_{-\infty}^t \Phi(t - \theta) E(\theta) d(\theta) \quad (31)$$

Que con un cambio de variable $u = t - \theta$

$$D(t) = \varepsilon_{\infty} E(t) + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \int_{-\infty}^t \Phi(u) E(t - u) d(u) \quad (32)$$

El primer término de la ecuación (32) representa la respuesta instantánea del sistema, al tiempo que el segundo término representa una respuesta con cierto retardo acacable como hemos dicho a la lenta respuesta de la polarización orientacional. Este resultado muestra además de una forma general cómo determinar conocida la función de respuesta a la polarización $\Phi(u)$ ante cualquier campo $E(t)$ que respuesta tendrá el dieléctrico $D(t)$. El conocimiento de la respuesta dieléctrica queda, pues, relegado a la determinación (teórica o experimental) de esta función, la cual, a su vez, está íntimamente ligada al mecanismo concreto de polarización causante del retraso de $D(t)$ frente al estímulo $E(t)$.

$$D(t) = \varepsilon_{\infty} E(t) + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) [\Phi(t) * E(t)] \quad (33)$$

donde el asterisco indica el producto de convolución. De acuerdo con las propiedades de la transformación de Fourier, la transformada del producto de convolución de dos funciones es simplemente el producto de las transformadas de cada una de las funciones. Como es sabido, la transformada de Fourier de una función matemáticamente implica la obtención de una función continua en función de la frecuencia. La aplicación de la transformada Fourier sobre los términos de la ecuación (33), puede obtenerse:

$$D(\omega) = \varepsilon_{\infty} E(\omega) + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) E(\omega) \varphi(\omega) \quad (34)$$

Donde $D(\omega)$, $E(\omega)$ y $\varphi(\omega)$ representan las funciones transformadas de Fourier de las respectivas funciones $\Phi(t)$, $E(t)$ y $D(t)$ respectivamente. La ecuación anterior (34) muestra como cada componente de la transformada de Fourier $E(\omega)$ del campo aplicado sobre el dieléctrico tiene una respuesta propia $D(\omega)$ obtenida mediante la función respuesta dieléctrica $\varphi(\omega)$, de manera independiente respecto las demás componentes. Este hecho simplifica enormemente la formulación de la respuesta dieléctrica en el espacio de frecuencias.

La corriente de desplazamiento, J_d , se encuentra desfasada un cierto ángulo respecto al campo eléctrico aplicado $E_0 e^{i\omega t}$. De este hecho se desprende que existirá una pérdida de energía en el dieléctrico debido al efecto Joule causado por la componente en fase con el campo eléctrico de la corriente de desplazamiento.

Dado un campo eléctrico sinusoidal, $\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_0 e^{i\omega t}$ la corriente de desplazamiento a través del dieléctrico será:

$$\mathbf{J}_d = i\omega\epsilon * \mathbf{E}(t) \quad (35)$$

La energía media, W , disipada por el sistema por unidad de volumen y por unidad de tiempo se puede calcular por la ecuación:

$$W = \frac{1}{2} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} J_d(t) E(t) dt \quad (36)$$

donde $\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_0 e^{-i\omega t}$, es decir, representa la función compleja conjugada de $\mathbf{E}(t)$. De acuerdo con las reglas de la notación compleja, el verdadero valor de W se obtiene calculando la parte real de la integral del segundo miembro de $W = \frac{1}{2} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} J_d(t) E(t) dt$, resulta entonces:

$$W = \frac{\omega\epsilon'' E_0^2}{2} \quad (37)$$

el producto $\omega\epsilon''$ es por definición de la parte real de la conductividad: $\sigma(\omega) = \omega\epsilon''(\omega)$. Por tanto, la ecuación $W = \frac{\omega\epsilon'' E_0^2}{2}$ expresa que la energía disipada (esto es, absorbida por el sistema) por unidad de volumen y por unidad de tiempo es proporcional a la parte real de la conductividad del medio. De la misma manera, dividiendo la ecuación $W = \frac{\omega\epsilon'' E_0^2}{2}$ por ω se obtiene la energía disipada por unidad de volumen y por radián, la cual es, en este caso, proporcional a la parte imaginaria de la constante dieléctrica. Por esta razón al cociente $\epsilon''/\epsilon_0 = \epsilon''_r$ se le denomina a menudo factor de pérdidas. La caracterización de las denominadas pérdidas dieléctricas es más conveniente emplear la tangente del ángulo δ , entre los vectores \mathbf{D} y \mathbf{E} en un diagrama complejo. La tangente de δ puede escribirse como:

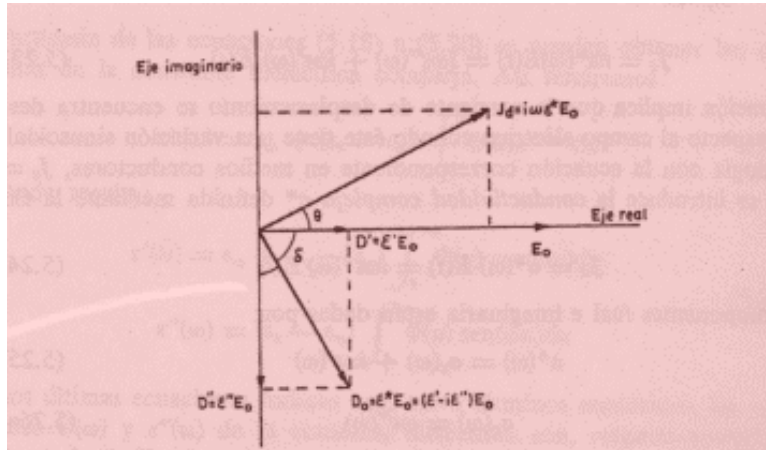


Figura 51 Representación del ángulo δ en función de los vectores \mathbf{E} y \mathbf{D} [32]

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)} = \frac{\sigma(\omega)}{\omega\epsilon'(\omega)} \quad (38)$$

La $\operatorname{tg} \delta$ es una magnitud sin dimensiones que refleja las pérdidas dieléctricas, dadas por la ecuación $W = \frac{\omega\epsilon'' E_0^2}{2}$, únicamente en aquellos casos en los que el ángulo δ es pequeño. En

efecto, de la figura anterior se desprende que $\varepsilon'' = (D_0/E_0)\sin\delta$. Por tanto, introduciendo este valor de ε'' en la ecuación:

$$W = \frac{\omega D_0 E_0}{2} \sin\delta \quad (39)$$

y para ángulos δ pequeños, se puede aproximar $\sin\delta = \tan\delta$, resultando W proporcional a la tangente del ángulo de pérdidas.

Los materiales utilizados como dieléctricos evidentemente necesitan un valor de la $\tan\delta$ tan bajo como sea posible en un margen amplio de frecuencias. Esto requiere que la parte real de la conductividad tanto en corriente alterna, como la asociada a la conducción por portadores libres, sea también baja.

4.3.1.1 Relaciones de Kramers-Krönig.

Las partes real e imaginaria de la constante dieléctrica tienen su origen en los mismos mecanismos de polarización, por ello es lógico pensar que debe existir una relación entre ambas. En efecto se puede demostrar que, conocida una, se puede calcular la otra mediante las siguientes expresiones, denominadas relaciones de Kramers - Krönig.

$$\varepsilon'(\omega) - \varepsilon_\infty = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\omega' \varepsilon''(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (40)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\varepsilon'(\omega') - \varepsilon_\infty}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (41)$$

Una aplicación destacable de las relaciones de Kramers - Krönig se desprende del hecho de que el factor de pérdidas suele presentar picos de absorción de energía separados por las regiones en las que toma un valor muy bajo. Por ello en la ecuación anterior solo hay contribución a la integral en los intervalos de frecuencia en el entorno de los picos.

Así podemos escribir dicha ecuación como:

$$\varepsilon'(\omega) - \varepsilon_\infty = \frac{2}{\pi} \sum_k \int_{\omega_k}^\infty \frac{\omega' \varepsilon''(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (42)$$

En la expresión anterior el índice k se refiere a los picos presentes en espectro del factor de pérdidas, con máximos a las frecuencias ω_k , y las integrales correspondientes se realizan sobre el intervalo de frecuencias entorno a los máximos.

De la misma ecuación se desprende que a una frecuencia ω dada, solo contribuyen a la parte real de la permitividad los picos tales que $\omega_k \gg \omega$, y cada uno lo hace con una cantidad.

$$\Delta\varepsilon_k''(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_{\omega_k}^\infty \frac{\varepsilon''(\omega')}{\omega'} d\omega' = \frac{2}{\pi} \int_{\omega_k}^\infty \varepsilon''(\omega') d(\ln\omega') \quad (43)$$

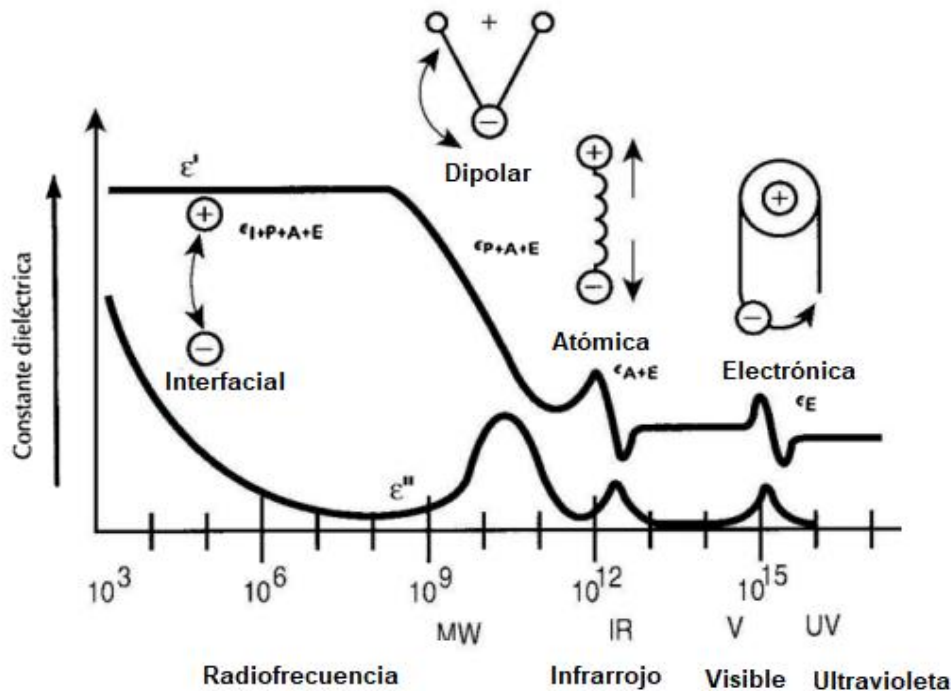
mientras que los picos que aparecen a frecuencias muchos más bajas no contribuyen. El significado físico de esta conclusión se basa en estos últimos picos están asociados a procesos de polarización con tiempos característicos más largos, de manera que no pueda seguir las variaciones del campo a frecuencias elevadas.

4.3.1.2 Curva de dispersión de la permitividad dieléctrica.

El análisis eléctrico dinámico juega un papel importante en la ciencia de los materiales y en la electroquímica. Este estudio consiste en el análisis de la parte real e imaginaria de la permitividad del material en función de la frecuencia a temperatura constante.

La espectroscopia de relajación dieléctrica se aplica también en muchas investigaciones, por ejemplo, en el estudio de las estructuras moleculares y supramoleculares de los polímeros, y en particular, de los mecanismos de movimiento de las mismas.

Esto es así, porque el campo eléctrico alterno que se aplica al material afecta directamente a los dipolos moleculares y provoca el movimiento de segmentos moleculares y grupos laterales.



Fuente: www.wikiwand.com/es/Espectroscopia_dieléctrica

Figura 52 Representación esquemática de las curvas de dispersión (permitividad dieléctrica), es importante observar las zonas, y las contribuciones, polarización interfacial I, de dipolo P, atómica A y electrónica E

Como se puede ver en la figura (figura 52), la curva de dispersión de la constante dieléctrica en la región de frecuencias donde tiene lugar la polarización orientacional tiene una forma diferente a la que se da en la zona de frecuencias donde tiene lugar la polarización iónica y electrónica. Esto es debido a que estos mecanismos son muy diferentes al de orientación molecular.

Desde el punto de vista fenomenológico, el comportamiento dinámico de la polarización orientacional obedece a un proceso de reorientación, también llamado de relajación. Por el contrario, los procesos de polarización iónica y electrónica se deben a un proceso de resonancia, en los cuales los iones y los electrones absorben energía cuando la frecuencia del campo entra en resonancia con la vibración de las cargas.

En los procesos de relajación los picos son mucho más anchos que en los de resonancias, ya que estos últimos se deben a transiciones iónicas y electrónicas entre los niveles discretos de energía.

Las ondas electromagnéticas con una frecuencia superior a 10⁹ Hz no excitan ninguna transición electrónica, de manera que no excitan ningún proceso de polarización. A

frecuencias algo menores pueden excitar los electrones más internos produciéndose algún tipo de absorción.

Por debajo de las frecuencias de resonancia de los electrones internos, estos contribuyen a la polarización resultando un valor de la constante dieléctrica algo superior a la unidad.

En el rango de frecuencias entre el infrarrojo y el ultravioleta, se producen numerosos picos de absorción debidos a las transiciones electrónicas entre los niveles discretos moleculares o de las bandas en los sólidos. Para frecuencias inferiores a este intervalo, todos los electrones contribuyen a la polarización, mediante el proceso de polarización electrónica.

A frecuencias más bajas aparecen fenómenos de resonancia ligados a las vibraciones de los átomos e iones en moléculas y sólidos.

A frecuencias por debajo de las de resonancia iónica, los iones pueden seguir las oscilaciones del campo externo, apareciendo la polarización iónica, la cual tiene su propia contribución a la constante dieléctrica.

La contribución de los dipolos permanentes se presenta a frecuencias aún más bajas, en los intervalos correspondientes a las microondas y la radiofrecuencia. A frecuencias inferiores aparece la contribución de la polarización orientacional.

Finalmente pueden ser observados procesos de relajación asociados a fenómenos interfaciales y a la conductividad del material. Los primeros tienen frecuencias características muy bajas, de algunos Hz.

A continuación, van a ser tratados algunos modelos que explican los fenómenos de relajación bipolar.

4.3.2 Relajaciones bipolares.

Los procesos de relajación dieléctrica que tienen lugar en un material se pueden estudiar a partir de la permitividad del material en función de la frecuencia y de la temperatura.

El modelo de Debye es la base de la interpretación de los procesos de relajación dieléctrica. Este modelo relativamente simple permite describir estos procesos de manera cualitativa, aunque se han realizado correcciones al mismo, de carácter empírico, para mejorar el aspecto cuantitativo de los estudios.

4.3.2.1 Modelo de Debye.

La hipótesis básica en el modelo de Debye es que cuando se establece o se suprime de manera repentina un campo eléctrico en un medio, la polarización en este evoluciona según un proceso cinético de primer orden. Bajo esta hipótesis la caída de la polarización se puede escribir en la siguiente forma diferencial:

$$\frac{d\mathbf{P}(t)}{dt} = -\frac{1}{\tau}\mathbf{P}(t) \quad (44)$$

Lo que significa que la tasa de variación de la polarización es proporcional a la polarización existente en cualquier instante.

El tiempo característico τ , tiempo de relajación del proceso, es independiente del tiempo, pero puede depender de la temperatura. Debye estableció el modelo para el movimiento browniano de rotación de dipolos sin interacción eléctrica entre ellos (gases o líquidos polares disueltos en sustancias no polares). Sin embargo, es aplicable también a medios en los que la polarización evoluciona según la ecuación anterior, como en el caso de cargas asociadas a defectos en la red cristalina, las cuales oscilan entre posiciones de equilibrio

separadas por barreras de potencial, y el caso del movimiento de carga libre en un circuito serie R-C.

En cualquier caso, y como ya hemos comentado, este modelo no se puede utilizar indiscriminadamente, puesto que se suelen observar discrepancias con los datos experimentales en la mayor parte de los casos.

Su utilidad radica en que describe, al menos cualitativamente y de manera sencilla, la respuesta de los dieléctricos a frecuencias que pueden ser seguidas por los dipolos permanentes presentes en el material.

Bajo la hipótesis anterior se puede deducir que la permitividad compleja se puede escribir:

Separando las partes real e imaginaria de la permitividad obtenemos:

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (45)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty})\omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (46)$$

En la ecuación anterior se da una representación esquemática de las partes real e imaginaria de la permitividad dieléctrica en función de la frecuencia para sistemas que obedecen al modelo de Debye. En esta figura se puede observar la disminución de ε'' con la frecuencia y la presencia de un máximo de ε'' (pico de absorción) como consecuencia de la relajación bipolar.

Este máximo tiene lugar para una frecuencia característica, y en torno a ella se produce la máxima variación de la parte real de la permitividad.

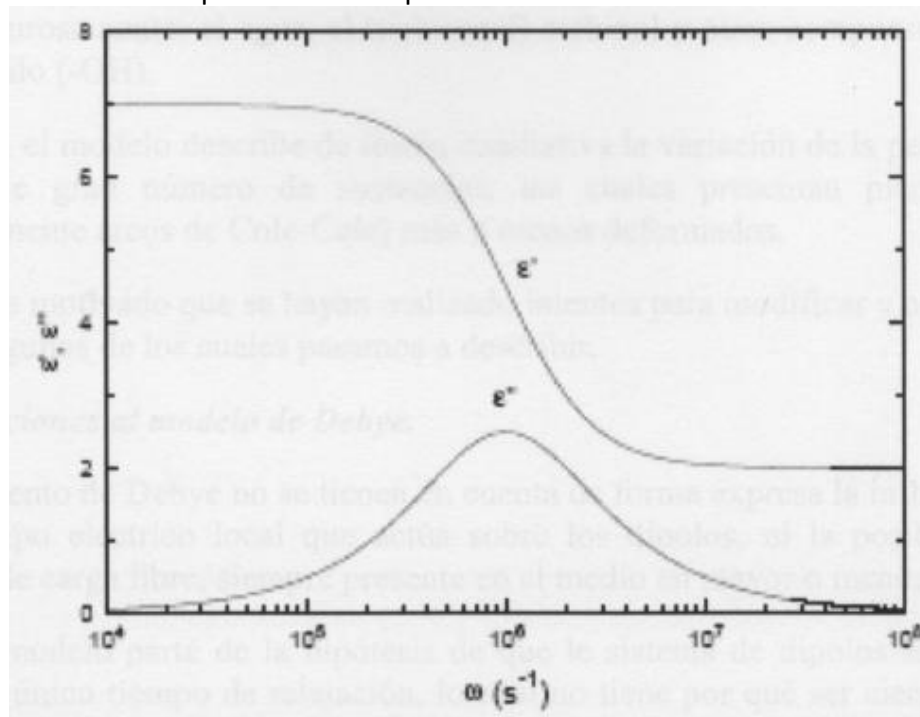


Figura 53 Variación con la frecuencia de ε' y ε'' [32]

5 El circuito equivalente

5.1 La base del circuito

Basando en los textos [30] [34]

Cuando un material es polarizado con un campo eléctrico $E(t)$, la densidad de corriente en el dieléctrico es la suma de la corriente por conducción y la corriente por desplazamiento, es su puede expresar con la siguiente expresión:

$$J(t) = \sigma E(t) + \frac{dD}{dt} \quad (47)$$

Donde $J(t)$ es la densidad de corriente total, σ es la conductividad en corriente continua, $D(t)$ es la densidad de flujo eléctrico, el cual tiene la siguiente relación con el vector de polarización.

$$D(t) = \epsilon_0 E(t) + P(t) \quad (48)$$

Donde ϵ_0 es la permitividad del vacío, mientras que la polarización observada $P(t)$, contiene dos partes:

$$P(t) = P_{rápida}(t) + P_{lenta}(t) \quad (49)$$

Donde $P_{lenta}(t)$ es la polarización lenta, $P_{rápida}(t)$ representa la polarización instantánea del material, el cual sigue los cambios del campo eléctrico, así pues, $P_{rápida}(t)$ puede expresarse como:

$$P_{rápida}(t) = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) E(t) \quad (50)$$

Donde ϵ_0 es la permitividad relativa del material. En general, un material no puede polarizarse de manera instantánea, en respuesta de un campo aplicado. Sin embargo, la polarización lenta es un proceso retardado que responde la polarización interfacial y la polarización dipolar. La polarización es la convolución del campo eléctrico $E(t)$ con la función de la respuesta dieléctrica del material dependiente del tiempo $f(t)$

Para un campo eléctrico cualquiera $E(t)$, los procesos lentos de polarización pueden darse:

$$P_{lenta}(t) = \epsilon_0 \int_0^t f(t - \tau) E(\tau) d\tau \quad (51)$$

Donde $f(t-\tau)$ representa el grado de retardo, con lo que la polarización quedaría de la siguiente manera:

$$P(t) = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) E(t) + \epsilon_0 \int_0^\infty f(t - \tau) E(\tau) d\tau \quad (52)$$

De esta manera la densidad de corriente total $J(t)$ debida a un campo eléctrico constante puede ser escrita como:

$$J(t) = \sigma E(t) + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{d}{dt} E(t) + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_0^t f(t - \tau) E(\tau) d\tau \quad (53)$$

De la ecuación anterior se deduce que, podemos caracterizar un material dieléctrico por su conductividad σ , su permitividad dieléctrica a alta frecuencia ϵ_0 y su función de respuesta dieléctrica $f(t)$ en el dominio del tiempo, tres características que arrojan una importante información sobre el material aislante.

5.1.1 Circuito deducido (Circuito extendido de Debye).

Si el material dieléctrico es considerado como un bloque homogéneo, el sistema aislante puede ser considerado como una caja negra. Cuando el sistema de aislamiento es polarizado con un campo eléctrico $E(t)$ producido por $U(t)$.

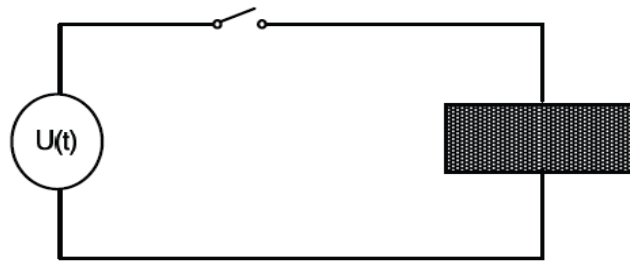


Figura 54 Diagrama esquemático de un sistema polarizado. [30]

La corriente total a través del aislante puede expresarse como:

$$i(t) = \int j(t) ds \quad (54)$$

La relación entre el voltaje a través del condensador y el campo eléctrico:

$$E(t) = \frac{U(t)C_0}{\epsilon_0 S} \quad (55)$$

Combinando las dos ecuaciones anteriores (54) y (55) y la ecuación (53), la ecuación de la corriente total se puede ser reescrita de la siguiente manera:

$$i(t) = C_0 \left[\sigma/\epsilon_0 U(t) + \int \epsilon_r \frac{d}{dt} U(t) + \frac{d}{dt} \int_0^t f(t - \tau) U(\tau) d\tau \right] \quad (56)$$

Si el sistema de aislamiento es homogéneo, entonces $R_g = \epsilon_0/(\sigma C_0)$ y $C_g = \epsilon_r C_0$. La ecuación anterior es podría ser rescrita reescribiendo en términos de parámetros aislados.

$$i(t) = \frac{U(t)}{R_g} + C_g \frac{dU(t)}{dt} + C_0 \frac{d \int_0^t f(\tau) U(t - \tau) d\tau}{dt} \quad (57)$$

La figura de “caja negra” (figura 54) puede verse simplificada de acuerdo con la figura 55:

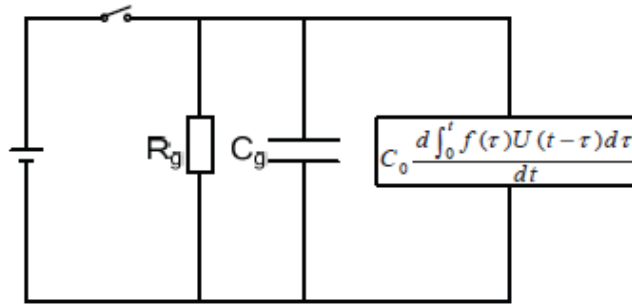


Figura 55 diseño esquemático de un aislamiento papel aceite [34]

Donde R_g representa la resistencia de fugas equivalente, la cual refleja la conductividad del aislamiento, C_g representa la capacitancia a 50Hz, con lo que las características geométricas del circuito equivalente pueden ser caracterizadas por R_g y C_g , mientras que los procesos de polarización pueden ser expresados por la ecuación $C_0 \frac{d}{dt} \int_0^t f(\tau) U(t-\tau) d\tau$.

Un circuito equivalente simplificado, como el que se muestra en la figura anterior, se puede emplear para describir los sistemas de polarización, este modelo se denomina, “modelo extendido de Debye (ED) y puede emplearse para describir matemáticamente los procesos de polarización de un material aislante.

5.1.2 Componentes de las ramas de polarización

Una vez determinada la componente geométrica del circuito, va a ser analizada la “caja negra” que representará los procesos de polarización presentes en el aislamiento que como se deduce en el modelo de Debye se describe como $C_0 \frac{d}{dt} \int_0^t f(\tau) U(t-\tau) d\tau$. La estructura básica papel aceite de un transformador es muy compleja, el aislamiento principal consiste en barreras de pressboard y pequeños espaciadores, papel (celulosa) impregnado y conductos de aceite, con todo esto para un propósito de modelado, se hace necesario analizar las características de polarización de un dieléctrico no homogéneo.

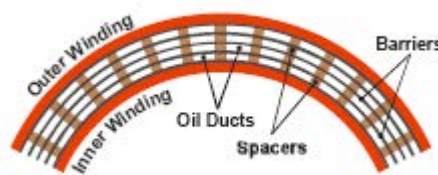


Figura 56 Estructura de aislamiento en un transformador [35]

La permitividad y la función de relajación de un dieléctrico caracterizan las propiedades de polarización de un dieléctrico compuesto de papel y aceite de un transformador. La función de relajación de Debye es una ecuación que representa dicha respuesta de relajación, esta ecuación representa la permitividad compleja ϵ del medio como función de la frecuencia del campo eléctrico ω .

$$\epsilon_r^*(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + i\omega\tau} \quad (58)$$

Esta ecuación es conocida como la ecuación de Debye [36], [37], [38]. Donde ϵ_∞ es la permitividad a altas frecuencias, donde ϵ_s es la permitividad estática, a bajas frecuencias, y τ es el tiempo de relajación característico del medio.

La evolución de la permitividad $\varepsilon(t)$ en el dominio del tiempo es obtenida aplicando la transformada inversa de Laplace.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})(1 - e^{-t/\tau}) \quad (59)$$

Esta ecuación cumple una ley exponencial y puede reescribirse como:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_s + (\varepsilon_{\infty} - \varepsilon_s)e^{-t/\tau} \quad (60)$$

Si un aislamiento papel-aceite puede ser equivalente a un condensador, entonces $C=C_0\varepsilon(t)$. La corriente a través del aislante puede expresarse como:

$$J(t) = dQ_0/dt = (1/\tau)C_0V_0(\varepsilon_{\infty} - \varepsilon_s)e^{-t/\tau} \quad (61)$$

Donde Q_0 es la carga y V_0 es el voltaje aplicado al condensador en el momento inicial, la ecuación anterior muestra que la corriente producida por el voltaje inicial decae con una ley exponencial, la constante de tiempo $\tau=RC$. Así pues, el proceso de polarización puede ser modelado por una resistencia en serie con un condensador, como puede observarse en la figura 57.

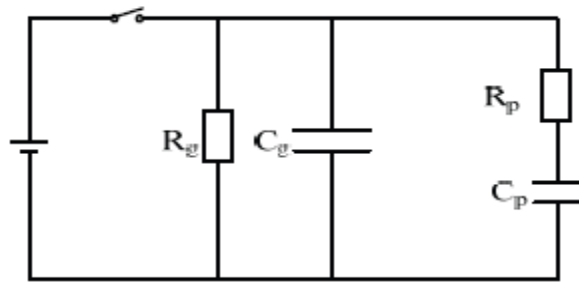


Figura 57 Diagrama que modela un dieléctrico con un solo tiempo de relajación. [30]

5.1.3 Circuito equivalente del Modelo Extendido de Debye

Son muchos los factores que afectan al proceso de polarización de un aislante papel-aceite, algunos de ellos son, envejecimiento, humedad, temperatura del propio aislante, esto hace que puedan existir varios tiempos de relajación. Una única rama RC no puede modelar la respuesta exactamente, en casos pueden darse varios tiempos de relajación de Debye.

Según describe Jonscher, los tiempos de relajación de Debye en el dominio del tiempo cumple una ley exponencial [36], todos los experimentos con materiales compuestos, estos pueden ser representados por un número de exponentes. Si los procesos de polarización lenta son representados con n ramas de polarización, la función de respuesta del dieléctrico se puede escribir como:

$$f(t) = \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{\tau_i} e^{-t/\tau_i} \quad (62)$$

Esta función sustituiría a “la caja negra” que se ha definido con anterioridad como $C_0 \frac{d \int_0^t f(\tau) U(t-\tau) d\tau}{dt}$ por lo que definiríamos un nuevo circuito equivalente con tantas ramas en paralelo como mecanismos de polarización, para los cuales $\tau_i = R_{pi}C_{pi}$.

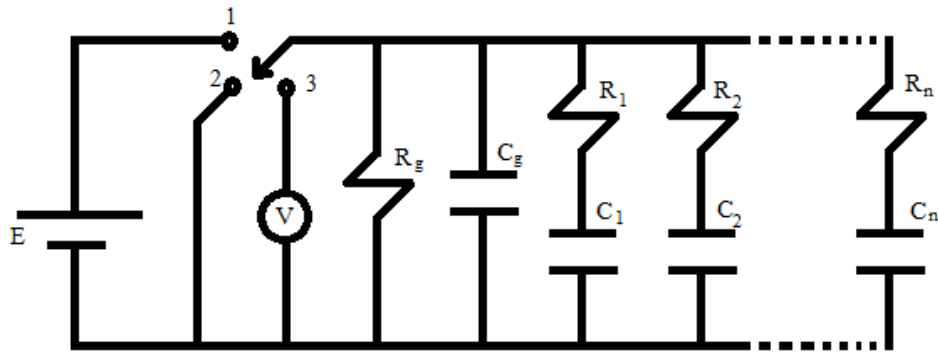


Figura 58 Circuito equivalente del circuito dieléctrico de un transformador (modelo extendido de Debye). [39]

5.2 Influencia de los componentes

La figura 57 mostrada en el epígrafe anterior más allá del circuito de medida podemos identificar los componentes del circuito equivalente de Debye, estos componentes tienen un sentido físico dentro del circuito dieléctrico del transformador, siendo el siguiente paso el estudio de la influencia de cada elemento en la respuesta ante un ensayo de RVM. Los elementos que analizar de manera independiente serán R_g , C_g y los pares R_p y C_p de cada rama de polarización. [39] [40]

5.2.1 Dependencia de R

En la figura 59 se muestra el resultado de una serie de simulaciones de un circuito equivalente extendido con tres picos de polarización, en todas las ocasiones se ha empleado el mismo modelo en el que solo se ha intercambiado la resistencia R_g .

Los valores de resistencia empleados han sido:

Tabla 7 Parámetros empleados para el estudio de sensibilidad respecto a R_g

Parámetro	RVM 1	RVM 2	RVM 3
C_g	2.6e-09	2.6e-09	2.6e-09
R_g	1000e6	100e6	22e6
C_1	1.e-006	1.e-006	1.e-006
R_1	5e5	5e5	5e5
C_2	1.e-006	1.e-006	1.e-006
R_2	4e7	4e7	4e7
C_3	1.e-006	1.e-006	1.e-006
R_3	5e8	5e8	5e8

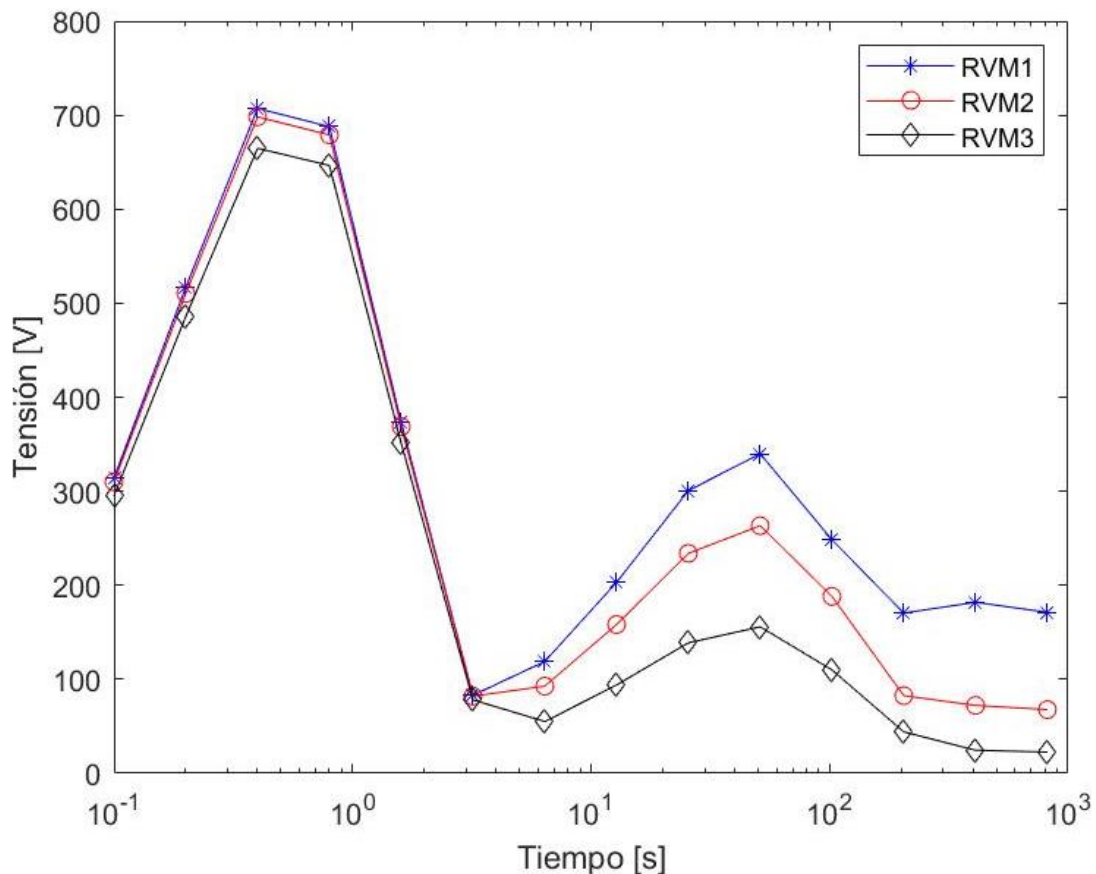


Figura 59 Representación de la sensibilidad en la respuesta ante la variación de R_g

Puede observarse que los valores de la curva de RVM se trasladan en paralelo, reduciéndose el valor global en la medida en la que se reduce el valor de R_g . En lo relativo a los valores de los picos de polarización no se observa sensibilidad alguna con respecto a la variación del valor de R_g , en todos los casos se observan que los máximos relativos y absolutos son para los tiempos 0,5sg, 40sg y 500sg.

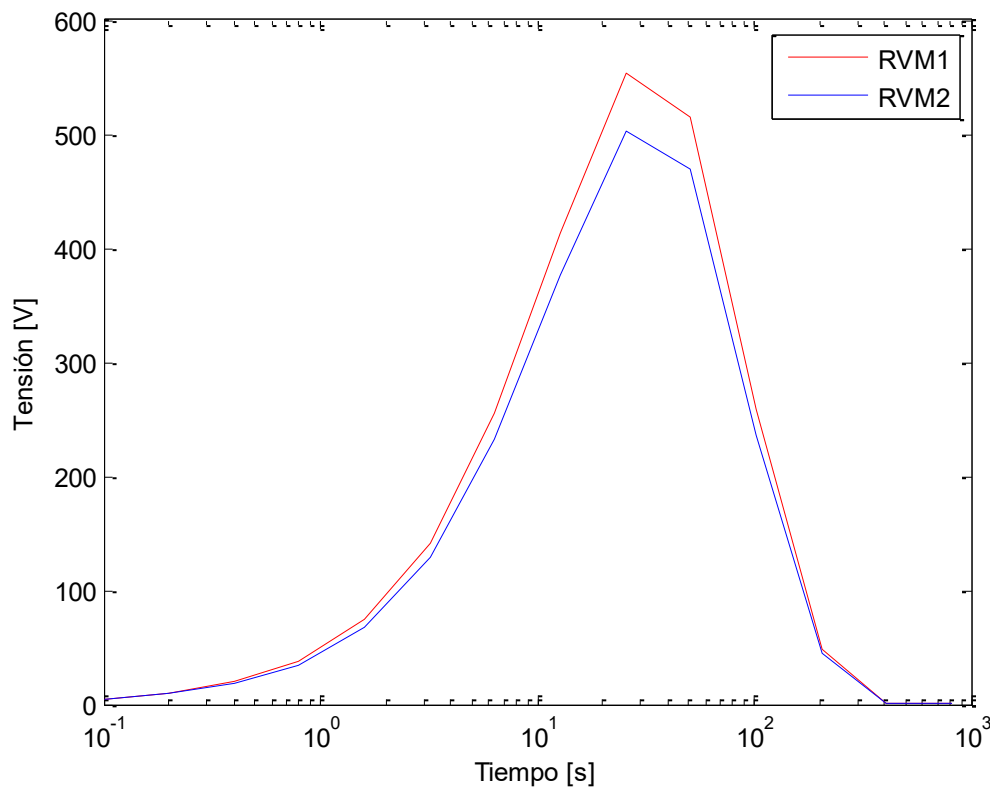
La resistencia R_g representa el aislamiento global, un valor alto indica una buena condición, mientras que un valor bajo de resistencia corresponde a un aislamiento envejecido, pero más importante aún es resaltar una conclusión que se extrae de lo visto hasta el momento, el método RVM es insensible a los efectos de reducciones locales del aislamiento como puede ser la contaminación en las paredes de elementos puestos a masa. [39] [40]

5.2.2 Dependencia de C

Para el caso del condensador C_g , se trata del condensador paralelo en circuito extendido de Debye de la figura 58 y que como ya se ha indicado representa la capacidad geométrica del dieléctrico, por lo que no es habitual que su variación a lo largo de sucesivos ensayos, dado que una variación apreciable en la capacidad de un transformador equivaldría que geométricamente su estructura se ha modificado, es decir, que existe un desplazamiento de bobinas, circuito magnético o de cualquier otro elemento constructivo, lo que se traduciría en que no se trata de un defecto o problema de envejecimiento del dieléctrico si no que se está ante una más que probable avería.

Tabla 8 Parámetros empleados para el estudio de sensibilidad respecto a C_g

Parámetro	RVM 1	RVM 2
C_g	2.6e-09	2.6e-09+ 86e-9
R_g	1e8	1e8
$C1$	1.e-006	1.e-006
$R1$	3e7	3e7

Figura 60 Representación de la sensibilidad en la respuesta ante la variación de C_g

En la figura anterior se muestra la influencia de la capacidad paralelo en un modelo con una sola rama de polarización con objeto de que sea más simple observar el efecto que ocasiona.

El valor absoluto del pico del ensayo de RVM muestra grandes variaciones en este caso, esto está causado porque la carga de polarización consume energía cargando la capacidad adicional energía que no se emplea en polarizar las distintas ramas de los distintos mecanismos de polarización.

Sin embargo, la curva de RVM mantiene una pendiente similar, así como la posición en el eje de tiempos, lo que es decir que no modifica el tiempo en el que se dan los máximos absolutos y relativos de las ramas de polarización. Esto es muy importante ya que como se ha indicado en el epígrafe anterior la resistencia en paralelo no modifica los tiempos dominantes ni las pendientes de la curva de RVM y de la misma manera la capacidad en paralelo tampoco, lo que quiere decir que las constantes de tiempo dominantes son ajenas a la geometría y al estado general del aislamiento. Esto se demuestra matemáticamente en un modelo con una sola constante de tiempo. [39] [40]

5.2.3 Dependencia de C_i y R_i

Los valores de las ramas en paralelo compuestas de un condensador y una resistencia serie mostradas en la figura 58, C_{pi} y R_{pi} que como se ha indicado con anterioridad representan los distintos procesos de polarización y sus constantes de tiempo asociadas, como parece evidente están asociados a la condición del conjunto papel aceite que forma el aislamiento que está siendo evaluado.

Para un material aislante la constante de tiempo dieléctrica τ es proporcional a la permitividad relativa ϵ_r , e inversamente proporcional a la conductividad específica σ , por lo que la constante τ es sensible a cambios en ambas dos ϵ_r y σ para el circuito representado en las distintas ramas τ viene determinado por C_{pi} y R_{pi} siendo $\tau=RC$ o introduciendo las características del material $\tau=\epsilon_0\epsilon_r/\sigma$. [40] [41]

5.2.3.1 Ramas con constantes de tiempo baja.

Las variaciones de C_{pi} y R_{pi} para las constantes de tiempo más pequeñas (inferior a 10sg) alteran los valores iniciales del resultado de RVM y dado que los valores de constante de tiempo bajos, están ligados a los mecanismos de polarización más rápidos, los valores de los primeros ciclos están relacionados con el estado del aceite [42], un aceite en buenas condiciones tiende a incrementar el valor de R_{pi} y se reduce la energía que almacena el dieléctrico a causa de la polarización del mismo, que equivale a una reducción C_{pi} que equivale finalmente a que los valores de tensión de RVM disminuyan en las medidas de los tiempos más pequeños, de la misma manera un aceite envejecido con presencia de agua u otros compuestos polares se representa en el ensayo de RVM con elevados valores de tensión en los primeros ciclos de medida, pudiendo llegar a ser un máximo absoluto, al disminuir la resistencia y aumentar la capacidad, es decir se almacena más energía en los distintos métodos de polarización que responden a esos tiempos de carga y descarga.

Tabla 9 Parámetros empleados para el estudio de sensibilidad respecto a ramas de polarización compuestas de C_{pi} y R_{pi} con constante de tiempo bajas.

Parámetro	RVM 1	RVM 2	RVM 3
C_g	2.6e-09	2.6e-09	2.6e-09
R_g	22e6	22e6	22e6
$C1$	1.e-006	5.e-006	2.e-007
$R1$	1.6e6	3.2e5	8e6
$C2$	1.e-006	1.e-006	1.e-006
$R2$	2e8	2e8	2e8

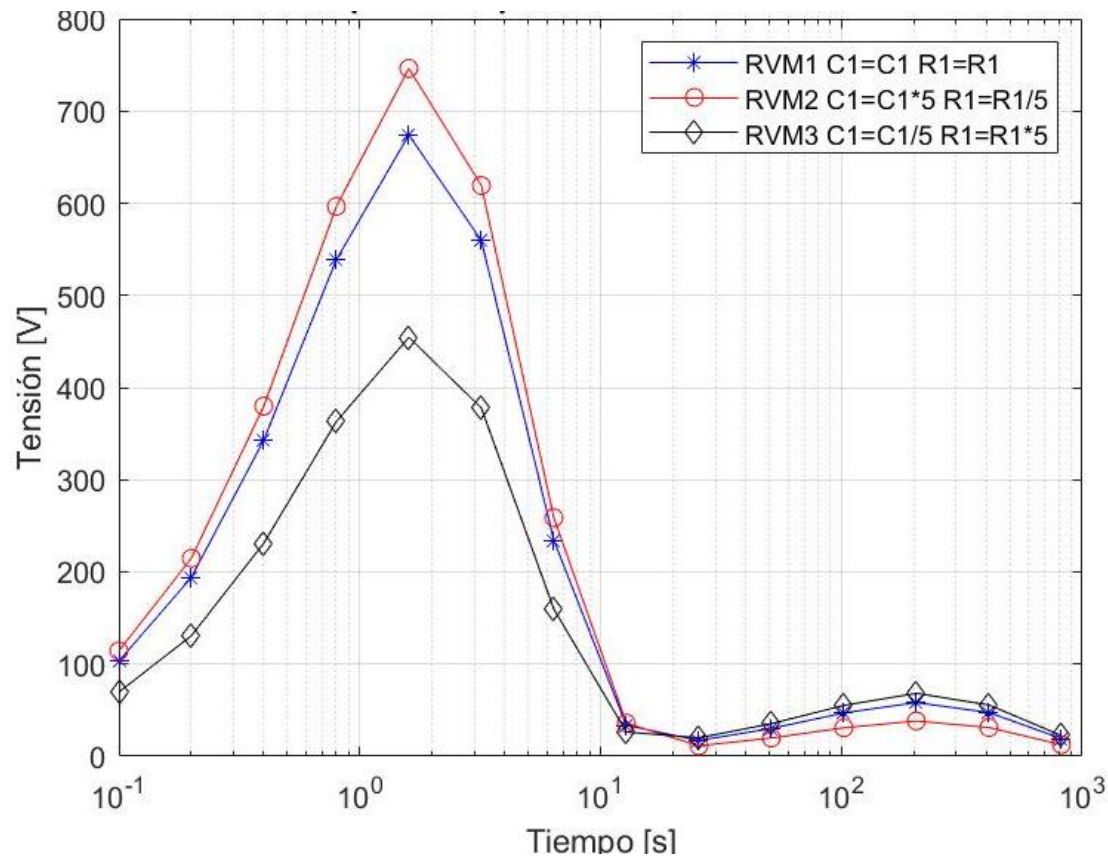


Figura 61 Dependencia del espectro de RVM de los valores C_i y R_i para las constantes de tiempo bajas

En la figura 61 puede observarse representada la respuesta RVM obtenida para tres diferentes pares de C_i y R_i para una constante de tiempo baja (para ser exacto una constante de tiempo de 1,6 segundos). La Task Force 15.01.09 de CIGRE publicó un documento [43] en el cual era indicado que en el caso de existir varios máximos (absolutos y relativos) en la curva además del tiempo dominante, en ese caso el tiempo dominante corresponde al estado del aceite y el resto de máximos relativos corresponden al aislamiento sólido.

Como se puede observar las variaciones de C_i y R_i para las ramas con constantes de tiempo bajas alteran el valor de pico de la constante de tiempo del ensayo de RVM sin afectar a la posición de los máximos relativos que se dan en tiempos bastante mayores, estamos hablando de que no altera la constante de tiempo, el valor del máximo relativo tiene cierta variación, pero la influencia de una rama sobre otra siendo tan amplia la diferencia de constantes de tiempos es despreciable.

De ser analizadas las curvas de RVM simuladas, se observa que con mayor R_i y menos C_i (mejor condición del aislamiento) el valor de la tensión de pico para esa constante de tiempo decrece como consecuencia de que se almacena menos energía en los procesos de polarización, es decir el aceite no está contaminado con compuestos polares.

5.2.3.2 Ramas con constantes de tiempo alta

Puede ser observado (figura 62) como el efecto de cambiar los valores de C_i y R_i para las ramas con constantes de tiempos altos no son significativos para el valor del primer pico del espectro RVM (que se mantiene como dominante, o como máximo absoluto) prosiguiendo con la simulación del epígrafe anterior. Las ramas de constantes altas en el modelo corresponden a la condición del papel afectando a la parte final del espectro de RVM.

Tabla 10 Parámetros empleados para el estudio de sensibilidad respecto a ramas de polarización compuestas de C_{pi} y R_{pi} con constante de tiempo altas.

Parámetro	RVM 1	RVM 2	RVM 3
C_g	2.6e-09	2.6e-09	2.6e-09
R_g	22e6	22e6	22e6
C_1	1.e-008	1.e-008	1.e-008
R_1	1.6e8	1.6e8	1.6e9
C_2	1.e-006	2.e-007	5.e-006
R_2	4e8	2.e9	8e7

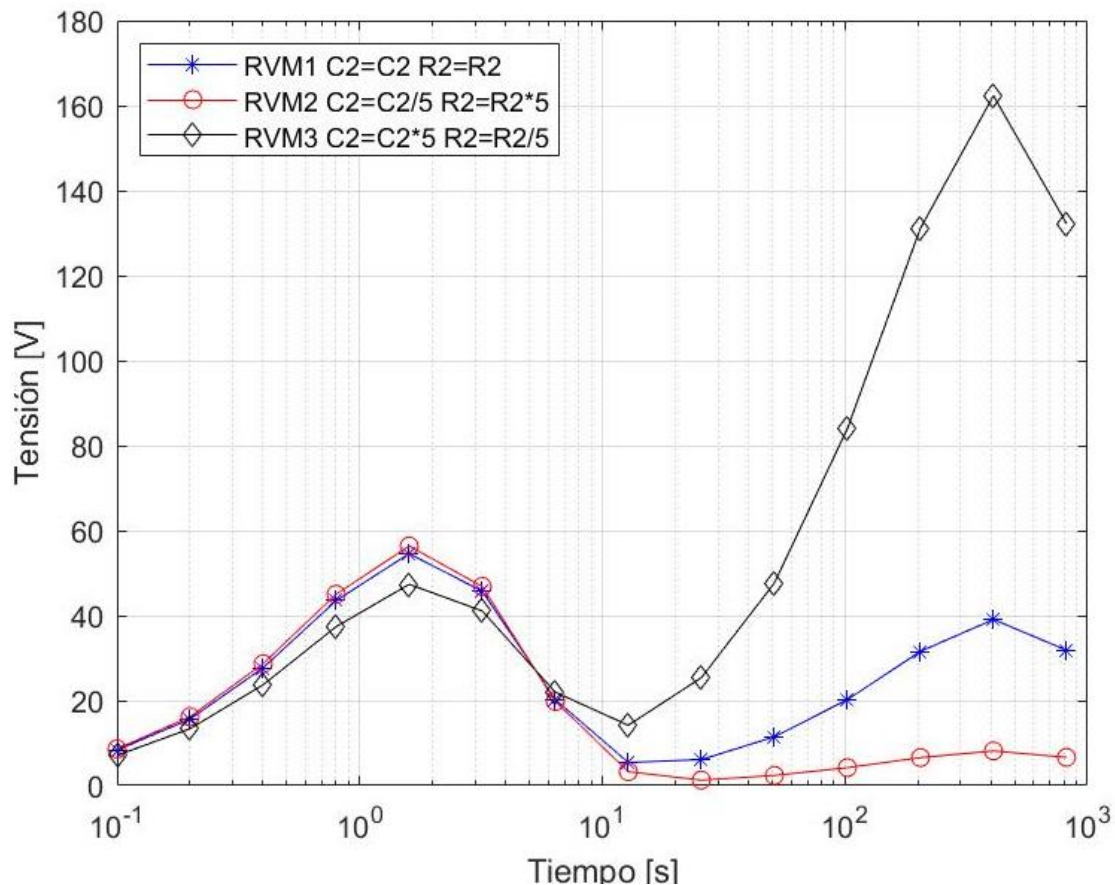


Figura 62 Dependencia del espectro de RVM de los valores C_i y R_i para las constantes de tiempo altas

Al igual que se ha visto con las ramas de constantes de tiempos bajos, cuando el gap entre tiempos de los distintos mecanismos de polarización es elevado como en este caso que se muestran los espectros de RVM para tres modelos con una rama en 1.6 segundos y otra rama en 400 segundos las variaciones en las ramas de tiempos altos no tienen apenas influencia en las ramas de tiempos bajos.

5.2.3.3 Ramas con constantes de tiempo media

En la siguiente simulación se va a proceder a simular un espectro de RVM compuesto por tres ramas de polarización en el que se variarán los valores de C_i y R_i de la rama intermedia salvo en la cuarta simulación. En las regiones intermedias de 30 a 300 segundos, se considera que se muestran los efectos de la polarización interfacial predominando sobre el papel y el aceite

[1] [43], en la cuarta simulación (RVM4) ha sido realizada una variación importante del valor de la tercera rama de polarización para ilustrar la escasa sensibilidad que tiene el sistema una vez la polarización interfacial es muy predominante.

Tabla 11 Parámetros empleados para el estudio de sensibilidad respecto a ramas de polarización compuestas de C_{pi} y R_{pi} con constante de tiempo medias.

Parámetro	RVM 1	RVM 2	RVM 3	RVM 4
C_g	2.6e-09	2.6e-09	2.6e-09	2.6e-09
R_g	22e6	22e6	22e6	22e6
C_1	1.e-008	1.e-008	1.e-008	1.e-008
R_1	1.6e8	1.6e8	1.6e8	1.6e8
C_2	1.e-006	2.e-007	5.e-006	5.e-006
R_2	8e7	4e8	1.6e7	1.6e7
C_3	1.e-006	1.e-006	1.e-006	5.e-006
R_3	4e8	4e8	4e8	8e7

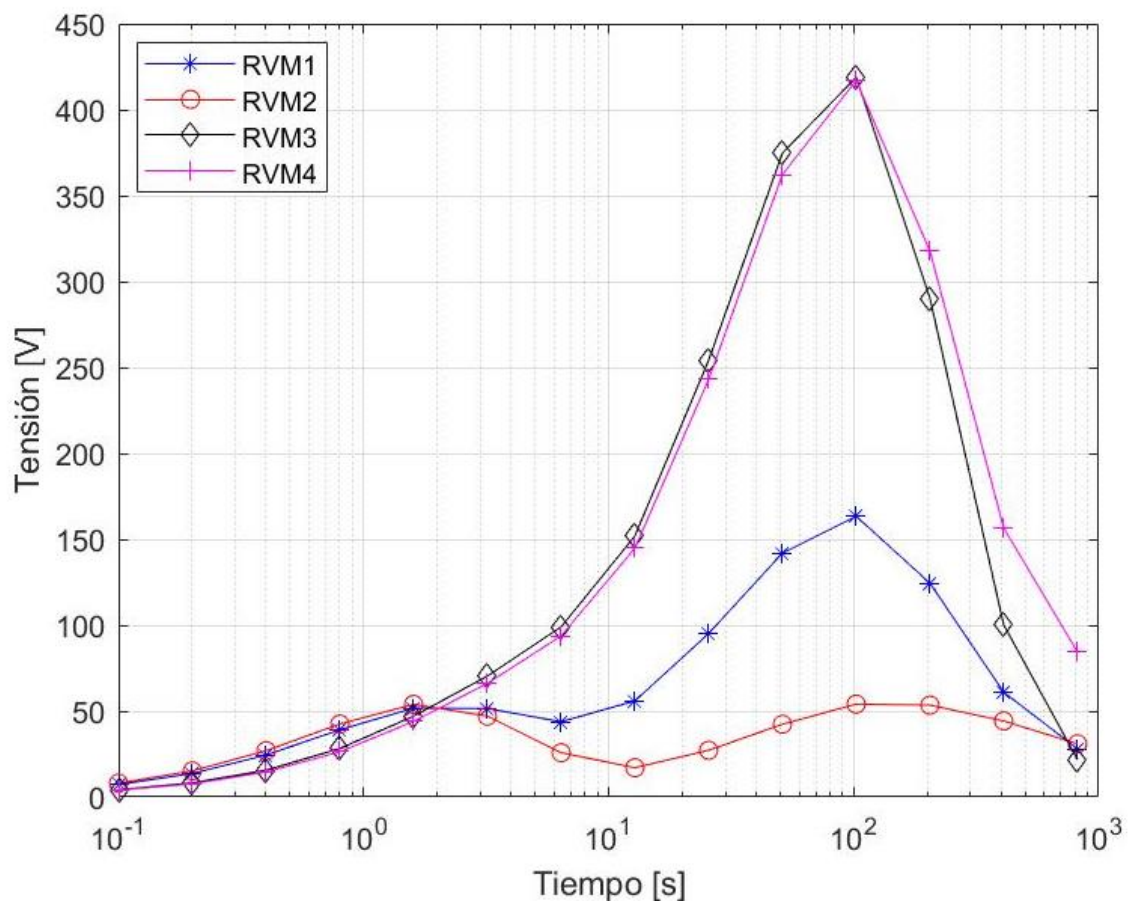


Figura 63 Dependencia del espectro de RVM de los valores C_i y R_i para las constantes de tiempo medias.

Ha sido indicado por los autores del Task Force 15.01.09 de CIGRE en su artículo que “un máximo absoluto en la zona intermedia del espectro indica una alta influencia de la “polarización interfacial” entre el aceite y el papel o entre el aceite y el pressboard en los conductos.”

Como se puede observar en la figura 63 los máximos tanto absolutos como relativos del espectro de RVM se ven afectados por los cambios en C_2 y R_2 hasta el punto de que no se distinguen máximos relativos, como se ha indicado este cambio en las ramas correspondientes a tiempos intermedios se puede achacar a la “polarización interfacial” de un aislante compuesto.

Para la interpretación de los resultados es importante observar que los efectos de la polarización interfacial son más claros sobre las ramas de tiempos altos, ya que aun cuando el valor de C_2 no es muy elevado el pico de la rama 3 que habría de darse en 400 segundos se ve desplazado hasta los 100 segundos.

Se puede así mismo derivar que la interpretación de una curva de RVM en los casos en los que existen fenómenos de polarización interfacial ha de limitarse a evaluar esta polarización, siendo la constante de tiempo un valor que no se corresponde ni con el valor del estado del aceite, ni con el valor correspondiente al estado del papel.

5.2.4 Relación entre tiempo de carga y descarga k

$$U_m(U_c, t_c) = U_c \cdot f(R_g, C_g, \tau_p) \left(e^{\frac{-kt_c}{\tau_p}} - e^{\frac{-(1+k)t_c}{\tau_p}} \right) \quad (63)$$

U_m = Tensión de pico en la tensión de recuperación

U_c = Tensión de carga

T_c = Tiempo de carga

K = Constante que determina la relación entre el tiempo de carga y el tiempo de descarga (normalmente es 2)

τ_p = Constante de polarización, que es el producto de $R_p C_p$

R_g = Resistencia de aislamiento

C_g = Capacidad geométrica

La función tiene un máximo, el cual depende de t_c y se da cuando $t_c = \tau_{cd}$

$$\tau_{cd} = \tau_p \ln \frac{1+k}{k} \quad (64)$$

Del estudio de la función, se deduce que el valor τ_{cd} depende únicamente del tiempo de polarización τ_p y de K , que la ratio escogido entre el tiempo de polarización y el tiempo de despolarización. El valor de K para obtener que $\tau_{cd} = \tau_p$ es de 0,578, en la práctica se emplea una $K=1/2$ que es una muy buena aproximación facilitando el funcionamiento de los equipos, siendo el error respecto del óptimo $\tau_{cd} = \tau_p$ inferior al 10%

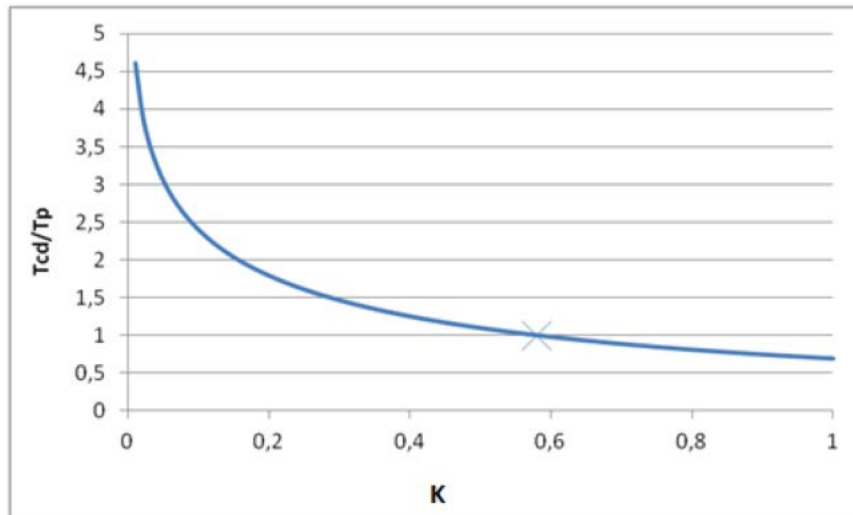


Figura 64 Evolución de la ratio τ_{cd}/τ_p dependiendo del valor de k

5.3 Compensación de temperatura de las mediciones dieléctricas

Es bien sabida la dependencia de los resultados de los ensayos dieléctricos respecto a la temperatura, por lo que es de gran importancia a fin de analizar los resultados y poder comparar tener en cuenta la temperatura a la que se ha realizado la medida [41] [44], [45], [46].

Con este propósito se presentará un algoritmo existente para llevar a cabo ajustes de temperatura en el dominio de la frecuencia, teniendo en cuenta el sentido físico de los algoritmos de conversión se puede mediante analogías trasladar el método al dominio del tiempo y aplicarse a curvas de RVM para hacer conversiones.

El método presentado puede, sin embargo, utilizarse sólo en dieléctricos lineales, si bien el conjunto papel aceite a nivel macroscópico se comporta como un dieléctrico lineal.

5.3.1 Compensación de temperatura para medidas en el dominio de la frecuencia (FDS)

En el artículo “Quantitative Analysis of Ageing Condition of Oil-paper Insulation by Frequency Domain Spectroscopy” [44] en el apartado 3.7 se describe el método para calcular el factor de cambio (“factor de desplazamiento de la frecuencia con la temperatura) α_T , que define la relación entre un factor de pérdidas a una temperatura dada f_T respecto a ese factor a la temperatura de referencia.²

(65)

$$\alpha_T = \frac{f_T}{f_{ref}}$$

Esto se ilustra con los resultados de los ensayos de FDS que se presentan en la figura 65 en los que la flechas indican el factor α_T por el cual cada elemento se debe desplazar con el fin de llegar a la curva de referencia a temperatura ambiente.

² En [46] se utiliza este método de compensación de temperatura en el dominio de la frecuencia.

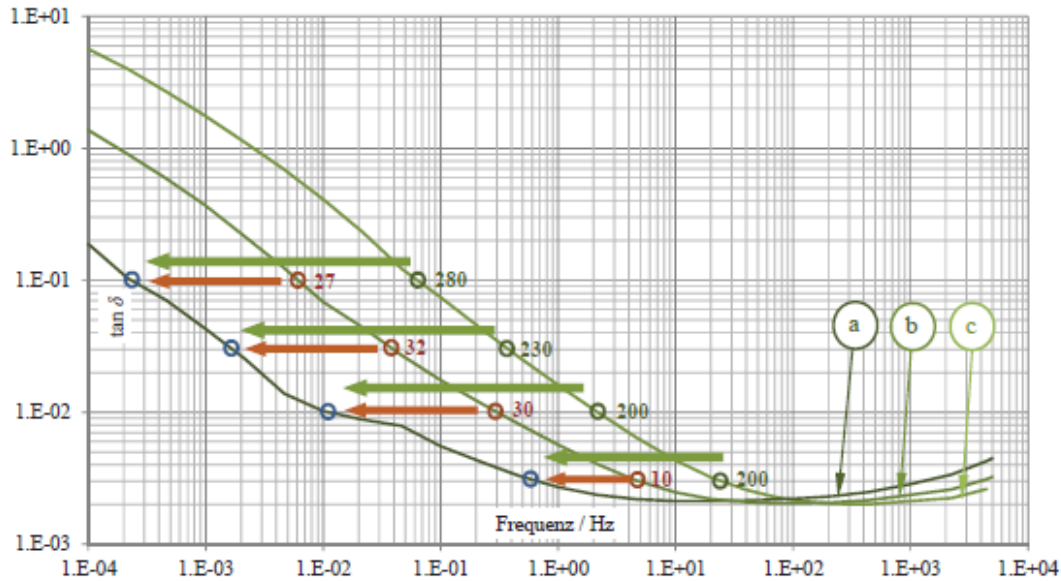


Figura 65 Medida de respuesta de pérdidas dieléctricas en el dominio de la frecuencia (FDS) de un mismo espécimen variando la temperatura (a) temperatura de referencia, (b) 50°C y (c) 75°C. [41]

Se puede observar como el factor α_T se mantiene dentro de un mismo orden para todo el rango de frecuencias siendo algo mayor para las bajas frecuencias las cuales son más sensibles a la temperatura.

5.3.2 Interpretación física de la corrección de temperatura

5.3.2.1 Interpretación en el rango de frecuencias

En un circuito básico con una sola rama de polarización como el mostrado en la figura 57 el factor de pérdidas se puede expresar de la siguiente manera:

$$\tan\delta(\omega) = \omega \cdot R_s \cdot C_s \quad (66)$$

Un cambio en la frecuencia de un valor $1/\alpha_t$ puede lograrse mediante un cambio en el que el τ_1 de la rama de polarización multiplicándolo por un valor α_t por lo que obtendríamos el mismo valor de pérdidas.

$$\tan\delta(\omega) = \frac{\omega}{\alpha_T} \cdot \alpha_T \cdot R_s \cdot C_s \quad (67)$$

El cambio de la constante de tiempo se puede ser interpretado como una variación del valor de R_s achacable a la variación de temperatura, dada la dependencia de la resistencia con respecto a dicha temperatura. Por ejemplo, una temperatura más alta conduce a un aumento de la conductividad del dieléctrico, con lo que se da el caso en el que la polarización interfacial se produce más rápido. Al mismo tiempo también aumenta la movilidad de las moléculas en el dieléctrico, de modo que los otros mecanismos de polarización se ejecutan más rápido. Estos efectos se expresan por un cambio en la resistencia R_s .

De la misma manera si una rama individual de polarización $R_i C_i$, se ve afectada por la variación de temperatura, todos los elementos R_i del circuito equivalente de un dieléctrico

lineal³ se desplazan en el dominio de frecuencia, si todas las resistencias R_i y R_∞ se multiplican por el factor de desplazamiento α_T .

Es necesario recordar que las pérdidas de un dieléctrico dependientes de la frecuencia se describen de la siguiente manera para el circuito equivalente que hemos descrito en este documento (circuito equivalente de Debye). [46]

$$\tan\delta(\omega) = \frac{\frac{1}{\omega \cdot R_\infty} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega \cdot R_i \cdot C_i^2}{1 + (\omega \cdot R_i \cdot C_i)^2}}{C_o + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1 + (\omega \cdot R_i \cdot C_i)^2}} \quad (68)$$

Tanto las resistencias R_i y R_∞ en esta ecuación se multiplican por la frecuencia angular ω , de modo que un cambio en la frecuencia puede ser compensada por un cambio opuesto simultáneo de las resistencias. Este es el uso del coeficiente α_T desplazamiento como se propone en [44] para el dominio de la frecuencia. En los artículos [44] y [46] argumentan que una relación lineal entre $\ln \alpha_T$ y $(1/T_{ref} - 1/T)$, y estas variables están vinculados a través de la relación de Arrhenius. En consecuencia, se aplica de forma análoga.

$$\alpha_T = e^{\frac{W}{k}(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T})} \quad (69)$$

Con esta ecuación, los factores de desplazamiento α_T para varios valores de temperatura se puede calcular como puede ser observado en la figura 66.

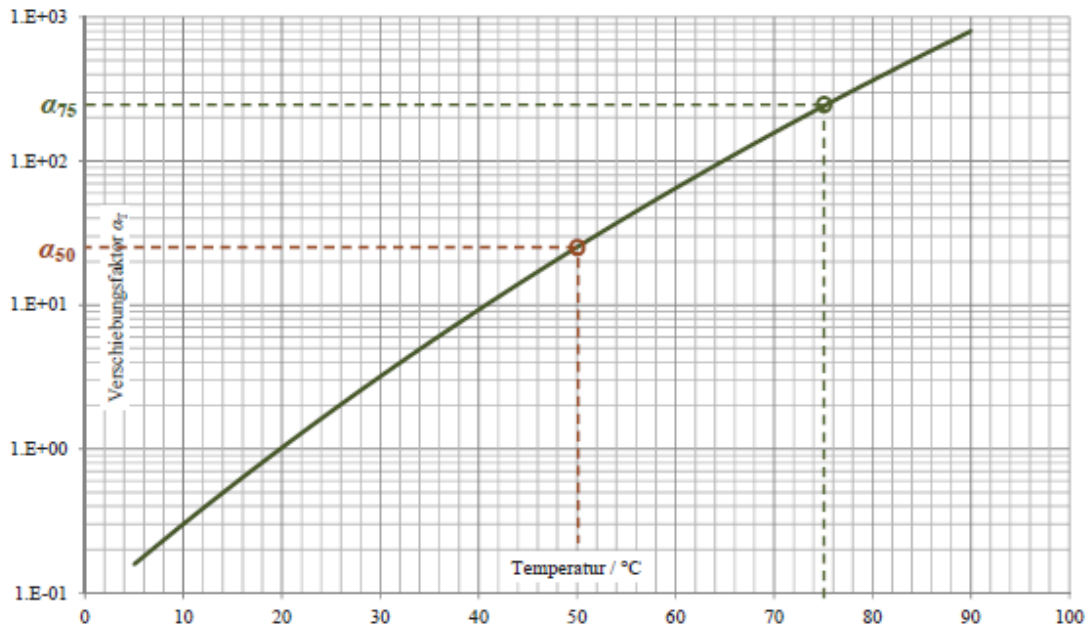


Figura 66 Aplicación de la ecuación de Arrhenius para el cálculo del coeficiente α_T [41]

La curva presentada en la figura 66 indica el valor de α_t para corregir los valores medidos a 20°C.

³ El aislante papel aceite a nivel macroscópico se supone un dieléctrico lineal.

5.3.2.2 Traslado al dominio del tiempo

Dado que las medidas de FDS en el dominio de la frecuencia y los ensayos de RVM son idealmente equivalentes y descritos por el mismo circuito equivalente por lo que es posible aplicar el mismo sistema sobre el circuito equivalente teniendo en cuenta las consideraciones teóricas pertinentes.

Un cambio de temperatura en un dieléctrico cambia la resistividad del dieléctrico, como ha sido indicado en el apartado 5.3.2.1 para trasladar la medida realizada a la temperatura de referencia usando la relación de Arrhenius. Todos los mecanismos de polarización (como pudiera ser la polarización interfacial, que es típica de bajas frecuencias) se dan en el dieléctrico a pesar del cambio de temperatura, se involucra la misma carga de polarización con la salvedad de que debido a la temperatura al cambiar la conductividad por lo que el fenómeno de polarización es más rápido o más lento.

Una carga de polarización constante se justifica en el hecho de que, los mecanismos de polarización se dan con independencia de la temperatura, es decir el campo eléctrico actúa sobre la carga respectiva, manteniéndose la carga eficaz, cambiando evidentemente la movilidad y consecuentemente la resistividad del dieléctrico. Esto como ha sido indicado en otras ocasiones se cumple para dieléctricos lineales.

La influencia de la temperatura sobre las curvas de FDS a lo largo de la gama de frecuencias se puede describir por el factor de desplazamiento α_T , se ha demostrado que el cambio en la frecuencia conlleva el correspondiente cambio en la constante de tiempo $\tau_i = R_i C_i$ es decir que cambia la conductividad del dieléctrico y se interpreta como un cambio en la resistencia R_i . ¿Cómo afecta el cambio en las resistencias en el circuito equivalente? Afecta al comportamiento temporal de la corriente de polarización obedeciendo a la siguiente ecuación.

$$i_p(t) = \frac{U}{R_\infty} + \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{U}{R_i} e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \quad (70)$$

En el dominio del tiempo, una corrección de temperatura de las resistencias R_i y R_∞ mediante un α_T , significa un desplazamiento de la curva de RVM medida, se desplaza a lo largo del eje de tiempo, que corresponde al cambio en la frecuencia y la variación de R_i efecto descrito en el apartado 5.2.3, y por otro lado, un desplazamiento vertical de la curva como se indica en el apartado 5.2.1.

De este modo se puede describir la corrección de temperatura tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, cambiando R_i y R_∞ en el circuito equivalente multiplicando por un valor α_T , por otro lado, dado que los mecanismos de polarización y en particular las cargas involucradas en la polarización seguirán produciéndose a diferentes temperaturas los valores de capacidad del circuito equivalente se mantendrán constantes.

5.3.3 Ejemplo corrección por temperatura

A fin de ilustrar el efecto de la temperatura sobre la medida de RVM y de cómo pueden ser referenciadas dos curvas a la temperatura de una de ellas, se ha tomado como ejemplo un ensayo sobre un transformador de potencia nuevo y por lo tanto con un aceite limpio y con una humedad inferior al 0,5% sobre el que han sido realizados dos ensayos:

- El primer de ellos cuando con aceite a 35°C poco después del reacondicionado posterior al llenado.

- El segundo el transformador se encontraba a 14°C una vez transcurrido tiempo suficiente para que el TP se atemperase a la temperatura de la caverna en la que está instalado.

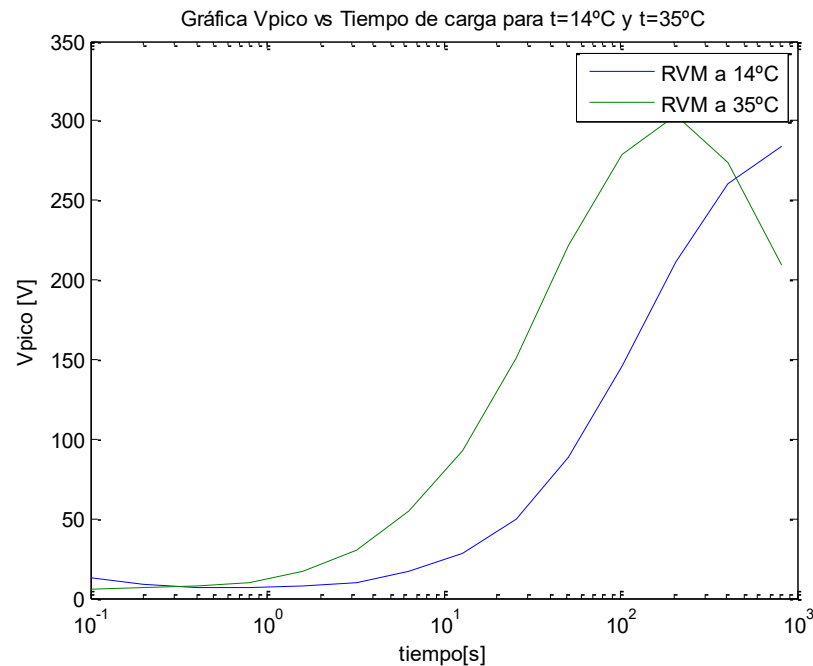


Figura 67 Representación de respuesta RVM de un TP nuevo a dos temperaturas distintas

En este caso puede ser apreciado como la respuesta obtenida se ha desplazado horizontalmente hacia la izquierda, lo cual como se ha explicado con anterioridad en el epígrafe anterior, responde a un proceso en el que al aumentar la temperatura se reduce la energía de activación, motivo por el cual se dan los mismos fenómenos con la salvedad de que estos acaecen en tiempos inferiores, de lo que se puede inferir una correlación entre curvas.

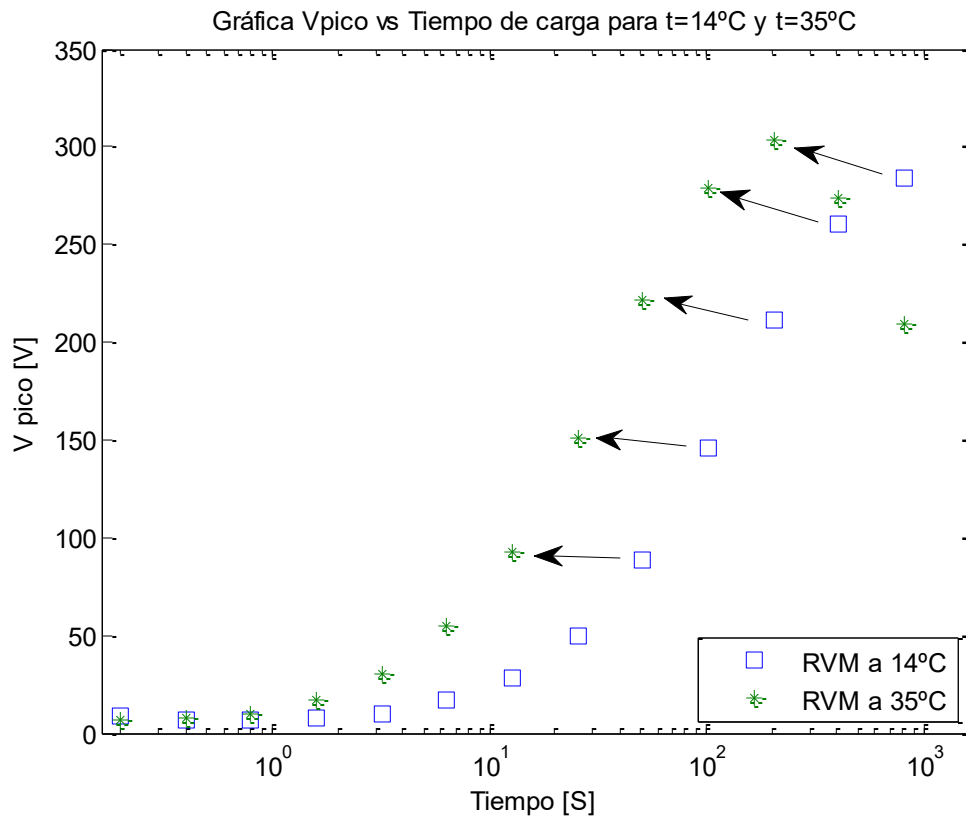


Figura 68 Representación de las "correspondencias" entre puntos de las respuestas RVM de un mismo TP medidas a 14°C y 35°C

Dado que el tiempo de pico para cada rama viene dado por $\tau_i = R_i C_i$ y como ya ha sido indicado C permanece constante con respecto a la temperatura, puede ser inferido que las variaciones de la resistencia con respecto a la temperatura son proporcionales a la variación de la constante de tiempo. En el caso que nos ocupa el aumento de la temperatura ha desplazado la curva a la izquierda prácticamente dos periodos.

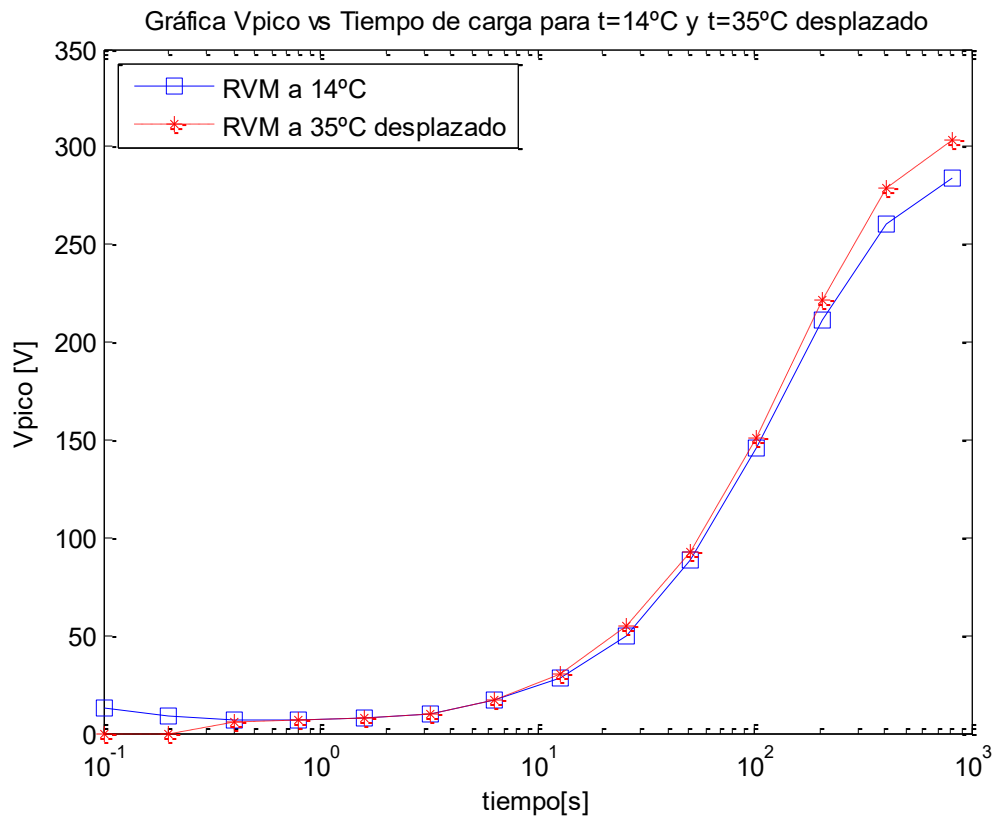


Figura 69 Superposición tras desplazar dos periodos de medida la curva de RVM a 35°C para observar la correlación con la curva medida a 14°C

De esta forma es posible hallar el factor α_{t35-14} viendo la relación entre los valores obtenidos a 14°C y sus equivalentes desplazados a 25°C

Tabla 12 Cálculo del valor para cada ciclo medido de α_{t35-14} después de trasladar la medida de RVM @ 35°C

Tiempo de carga	RVM @ 14°C	RVM @ 35°C	RVM @ 35°C desplazado	α_{t35-14}
0,1	12,8	5,5	0	
0,2	8,5	6,5	0	
0,4	6,5	7,6	5,5	0,85
0,8	6,6	10,2	6,5	0,98
1,6	7,4	16,4	7,6	1,03
3,2	10	30,7	10,2	1,02
6,4	16,5	54,3	16,4	0,99
12,8	28,2	93,1	30,7	1,09
25,6	50	151,2	54,3	1,09
51,2	88,3	221,7	93,1	1,05
102,4	145,9	278,6	151,2	1,04
204,8	211,7	303,7	221,7	1,05
409,6	260	274	278,6	1,07
819,2	284,1	209,2	303,7	1,07

Este es el valor α_{t35-14} obtenido desplazando el eje de tiempo de ambas medidas para que se superpongan. Para proseguir con el ejemplo el siguiente paso es el de calcular los

parámetros equivalentes para las curvas superpuestas y obtener el valor α_{t35-14} que relaciona las resistencias para similares capacidades.

Tabla 13 Valores de las ramas de un circuito equivalente para un aislamiento a 35° y para un aislamiento a 14 y cálculo del factor α_{t35-14}

Ciclo	RVM @ 14°C			RVM @ 35°C desplazada			α_{t35-14}
	Ci [F]	Ri [Ohm]	Vpico i [V]	Ci [F]	Ri [Ohm]	Vpico i [V]	
1	3,45E-10	2,90E+08	12,8			0	
2	1,70E-13	1,18E+12	11,8			0	
3	9,29E-13	4,30E+11	7,9	3,58E-15	3,82E+11	7,1	0,887
4	9,07E-11	8,82E+09	6,6	1,69E-11	9,01E+09	6,8	1,022
5	6,50E-11	2,46E+10	7,6	1,43E-10	2,45E+10	7,5	0,996
6	5,28E-11	6,06E+10	9,6	2,35E-11	6,48E+10	10,3	1,069
7	5,51E-11	1,16E+11	15,8	7,04E-12	1,25E+11	17,0	1,072
8	3,87E-11	3,31E+11	28,5	8,51E-11	3,55E+11	30,6	1,072
9	8,14E-11	3,15E+11	51,5	1,56E-10	3,37E+11	54,9	1,070
10	4,14E-10	1,24E+11	89,4	4,72E-10	1,31E+11	94,2	1,057
11	2,45E-09	4,19E+10	144,2	2,42E-09	4,39E+10	151,1	1,050
12	7,59E-09	2,70E+10	209,9	8,27E-09	2,84E+10	220,3	1,052
13	1,21E-08	3,39E+10	268,4	1,00E-08	3,57E+10	283,7	1,054
14	1,10E-07	7,45E+09	283,2	1,20E-07	7,98E+09	303,4	1,071

Como puede ser observado en la tabla en la simulación de las curvas el factor α_{t35-14} es prácticamente el mismo que el obtenido anteriormente desplazando las curvas, que viene a demostrar que una variación en la temperatura se refleja desplazando la curva sin variar su morfología, dado que la energía almacenada en los distintos procesos de polarización se conserva constante, es decir la capacidad de cada rama no varía.

En este ejemplo con mayor valor argumental que matemático dado que el ajuste se ha hecho de una manera muy gruesa, desplazando dos ciclos completos cuando es probable que se pudiera haber realizado un ajuste más fino, de ahí las pequeñas diferencias en las capacidades calculadas en las dos simulaciones, nos ha permitido demostrar el efecto de la temperatura y que es un factor a tener en cuenta.

5.3.4 Aplicabilidad de la corrección por temperatura

En los apartados anteriores se describe cómo se debe de realizar un ajuste por temperatura de una curva de respuesta dieléctrica, ya sea en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia y su interpretación física, prosiguiendo con la argumentación iniciada en el ejemplo del apartado anterior en el caso de interpretar dos gráficas de RVM con un claro desplazamiento podremos inferir que los ensayos se han realizado con distintas temperaturas.

En el presente documento y para alcanzar las conclusiones a las que queremos llegar ha sido desestimada la influencia de la temperatura por las siguientes razones:

- La corrección α_t es difícil de llevar a cabo cuando las condiciones fisicoquímicas del aceite han variado dado que nuestros ensayos son previos y posteriores a una manipulación del aceite, por lo que sí es recuperada la ecuación en la es definido α_t no podrá ser aplicarla dado que no es posible asumir la linealidad del dieléctrico antes y

después del tratamiento dado que han variado los términos de energía de activación y la constante k del dieléctrico al variar las propiedades físico químicas del mismo.

$$\alpha_T = e^{\frac{W}{k}(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T})} \quad (71)$$

- La variación de temperatura entre ensayos es mínima dentro de lo que es asumible en unos ensayos realizados en campo sin poder controlar la temperatura, esta afirmación se sustenta en que los ensayos se realizan coincidiendo con los mantenimientos y los transformadores como norma general han permanecido como mínimo y en el mejor de los casos 24 horas fuera de servicio antes de realizar el ensayo por lo que la temperatura de ensayo está próxima a la temperatura ambiente, entre 18 y 25°C.

6 Algoritmo

6.1 Descripción del algoritmo

Para la realización de este trabajo ha sido desarrollado un algoritmo el cual tiene como principal objeto la obtención de los valores de los elementos de las ramas de polarización de un circuito equivalente de Debye (R_n y C_n), los parámetros obtenidos han de ser aquellos que permitan que simulado sobre el circuito equivalente obtenido un ensayo RVM, compuesto por 14 ciclos semejante al realizado en campo, arroje un valor tal que se solape con la curva obtenida en el ensayo RVM realizado en campo

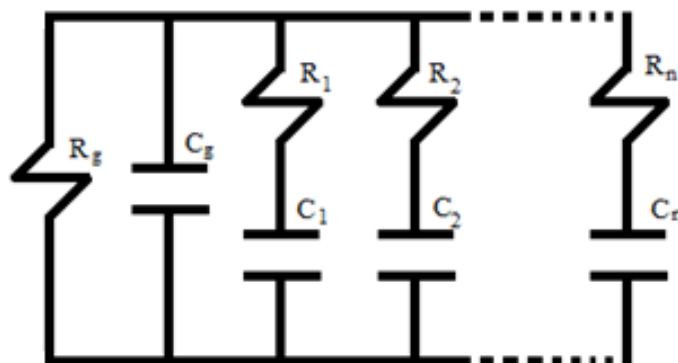


Figura 70 Circuito extendido de Debye

El circuito equivalente de Debye empleado es el tradicional compuesto por R_g , C_g , y en este caso se ha seleccionado un circuito compuesto por 14 ramas, tantas como ciclos son realizados en los ensayos de RVM empleados en campo, otros autores son partidarios de emplear números de ramas más pequeños intentando optimizar el número de ramas empleadas [30], [34], [40] y [47]. Dado que el objeto del estudio es averiguar cuáles son aquellas ramas sensibles a las distintas acciones realizadas sobre el aceite del transformador se ha decidido no reducir el número de estas.

El modelo diseñado para la elaboración de este documento, tiene la particularidad de mantener en todo momento un número constante de ramas de polarización (14 en total) las cuales tienen como particularidad que mantienen la constante de tiempo constante, es decir un aumento de C_n forzosamente conllevará asociado un decremento proporcional de R_n , de esta manera es ejecutado en todas las ocasiones el mismo barrido, con esto se consigue un modelo normalizado que facilita realizar el análisis de sensibilidad con el que a la postre se obtendrán las conclusiones.

Existen otros modelos más complejos tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia:

- El descrito por Rainer Patsch en [35] donde se emplean circuitos de “*Maxwell model for two dielectrics in series*”, se trata de un modelo que en el de combinan dos dieléctricos en serie modelados por circuitos extendidos de Debye, el mayor grado de detalle en los resultados exige un mayor grado de conocimiento de la geometría interna del transformador, datos que son inaccesibles para la mayoría de las utilities, e incluso para los fabricantes en aquellas unidades antiguas.
- El modelo de Cole-Cole empleado por Ojha para modelar la respuesta dieléctrica de un aislamiento papel aceite de un transformador, que por la propia naturaleza del

modelo estudia la dependencia respecto a la frecuencia de la permitividad de los materiales, y demuestra que el diámetro del círculo de Cole-Cole depende de la condición del aislamiento. [48]

Una de las grandes virtudes del modelo extendido de Debye radica en que matemáticamente describe los mecanismos de polarización presentes en el dieléctrico (electronic, ionic, interface and orientation polarization), cada rama representa un posible mecanismo de polarización o varios dado que un mismo compuesto disuelto en el aceite puede presentar varios de esos mecanismos [49] [32], los compuestos presentes en el aislamiento al polarizarse absorben energía, la energía absorbida para cada tiempo de polarización viene representada por el valor de capacidad de la rama correspondiente a esa constante de tiempo, la evaluación de la capacidad de las distintas ramas determinará que ramas son más activas y por lo tanto correlacionar dichas constantes con los mecanismos que están actuando.

Los parámetros del circuito equivalente de Debye con los que se han realizado las simulaciones se han obtenido por tres métodos:

- C_g : es el valor directamente medido en los ensayos de capacidad y factor de pérdidas dieléctricas.
- R_g : es un valor estimado calculado en función a la evolución de la resistencia de aislamiento en el ensayo de índice de polarización.
- R_n y C_n : se obtienen en base a un proceso iterativo en el que los valores τ_n de cada rama está prefijados.

A continuación, se describe cómo se ha obtenido cada parámetro, si bien tanto C_g , como R_g se estiman de la manera convencional de acuerdo con lo descrito en la literatura consultada.

6.1.1 Obtención de C_g

C_g representa la capacidad geométrica del sistema simulando, esta capacidad es obtenida de forma directa del ensayo de capacidad y factor de pérdidas dieléctricas el cual es realizado como parte de los ensayos habituales de un transformador [30], [24] [40]. Es importante no cometer el error de emplear la capacidad medida en la configuración alta masa dado que si se observa el circuito de ensayo (figura 71 y figura 72) puede ser apreciado que la capacidad medida del sistema es la suma de la capacidad alta masa (CH) más la capacidad alta baja (CHL) en paralelo despreciando la capacidad baja masa (CL) al estar esta puenteada con tierra. Es por este motivo que el valor empleado es el medido en la configuración GST⁴ (Ground Speciment Test) del equipo de ensayo de capacidad y factor de pérdidas dieléctricas es decir CH+CHL. El procedimiento y los pormenores de este ensayo se encuentran descritos en el epígrafe 7.1.1.1.4.

⁴ El modo GST se emplea para la medida de aislamientos respecto a tierra.

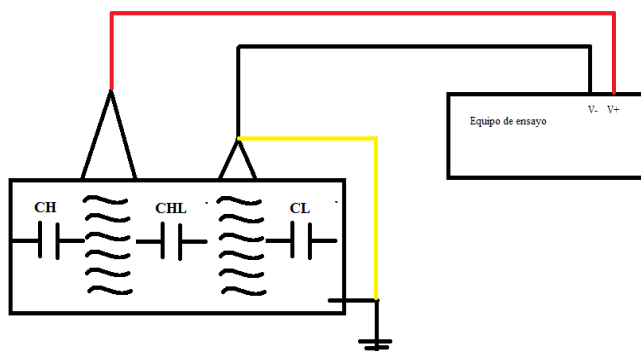


Figura 71 Configuración ensayo RVM sobre un TP de dos devanados

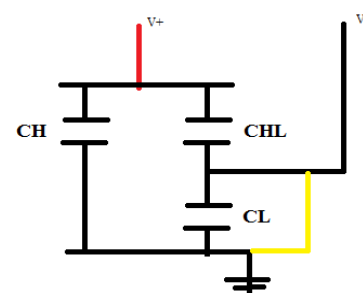


Figura 72 Esquema simplificado de capacidades encontradas en el ensayo RVM para un TP de dos devanados

6.1.2 Obtención de R_g

De acuerdo a la literatura el valor R_g representa la resistencia de fugas para un tiempo teórico infinito, es decir R_g es equivalente a R_∞ , la cual representará las fugas por conducción del aislante una vez hubieran concluido todos los mecanismos de polarización, este valor de R_∞ es el que puede ser hallado en los ensayos de PDC dado que el dieléctrico es sometido a un campo eléctrico constante durante un tiempo suficiente para que la lectura de la corriente de fuga se estabilice [30], [24], [40] .

Dado que no es un ensayo muy común y que en nuestro caso no se ha realizado ha sido necesario estimar este valor, para ello se ha empleado la medida de resistencia de aislamiento a los 10 minutos y todos su valores minuto a minuto, la cual se emplea comúnmente para determinar el índice de polarización $I_p = \frac{R(\Omega)_{10'}}{R(\Omega)_{1'}}$, en nuestro caso se ha realizado un ajuste de los diez valores minimizando el error entre los valores de resistencia minuto a minuto del ensayo de índice de polarización del ensayo real y una función del tipo $R(t) = A \cdot \log_{10}(t) + B$ una vez se obtienen los coeficientes A y B que hacen mínimo el error se calcula el valor de resistencia estimado a los 300 minutos.

El valor de resistencia a los 300 minutos se ha tomado en base a la experiencia y lo indicado en diversos artículos en los que se habla que un ensayo de PDC puede llevar entre 8 y 10 horas, es decir que la corriente estabiliza entre 240 y 300 minutos aproximadamente.

Ejemplo

Dado el resultado del ensayo de resistencia de aislamiento de un transformador real:

Tabla 14 Valores obtenidos de resistencia de aislamiento, medido durante 10 minutos, valores registrados minuto a minuto.

Tiempo (min)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Resistencia de aislamiento [Gohm]	5,17	5,95	6,41	6,71	6,93	7,10	7,24	7,35	7,45	7,54

Se calculan los coeficientes que minimizan la función:

$$sim(x) = coef(1) * \log(x) + coef(2) \quad (71)$$

Los cuales son:

$$\text{coef}=[1.0263 \ 5.2359]$$

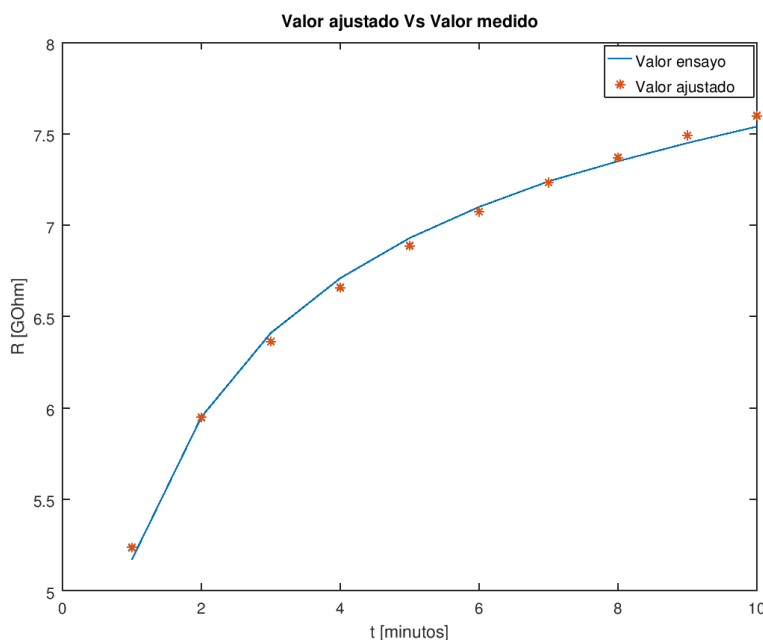


Figura 73 Representación valor ajustado respecto a valor medido de resistencia de aislamiento

El valor empleado de R_g finalmente sería $R_g = 1.0263 \cdot \log(300) + 5.2359 = 11.090 \text{ GOhm}$

Este valor ha de estimarse dado que no resulta práctico realizar un ensayo de resistencia de aislamiento, o de PDC más aun cuando se trata de un ensayo en el que se han de medir valores de pico-amperios hasta llegar a la estabilización lo cual resulta muy complicado en la práctica en una subestación eléctrica energizada por el ruido eléctrico existente.

Como se ha indicado en apartado 5.2.1 en el que se describe la sensibilidad de la respuesta del ensayo RVM a las variaciones en la resistencia R_g , los posibles errores fruto de la inexactitud en el cálculo son de amplitud en la respuesta, sin embargo no tiene ninguna repercusión el tiempo de las ramas de polarización ni en su número, por lo que se puede afirmar que en el objeto del estudio propuesto en esta tesis de comprender que ramas de polarización son sensibles a los distintos procesos o tratamientos realizados sobre el aislante líquido de un transformador no tiene influencia.

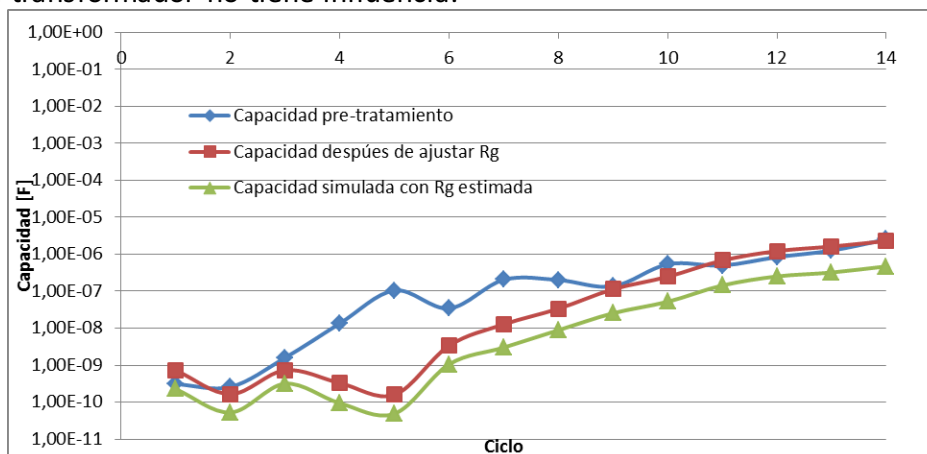


Figura 74 Variación de capacidad en función de R_g : R_g estimada= 5.04×10^{13} R_g ajustada 1.26×10^{13}

En las ocasiones en las que es necesario realizar un ajuste dado que se observa que la curva C_n de la respuesta posterior al tratamiento está claramente desplazada hacia abajo, el valor de R_g ha de ser ajustado con objeto de que el valor C_{14} confluya en el pre-tratamiento y en el pos-tratamiento, el motivo es que, en base a las constantes de tiempo, el valor C_{14} corresponderá a las fibras de papel más largas y con mayor DP (grado de despolimerización), la respuesta dieléctrica de esta parte del aislamiento tras un tratamiento en el aceite no ha de variar empleando este valor como ancla. El valor C_{14} variará en aquellos ensayos en los que se estudie un envejecimiento y por lo tanto se haya producido despolimerización del papel.

6.1.3 Obtención de C_n y R_n

Los parámetros C_n y R_n son los que determinarán el valor y peso específico de cada una de las ramas de polarización se ha empleado un circuito equivalente (Circuito extendido de Debye) [30], [24], [40] con un número de ramas fijo (14 ramas) y cada una con una constante de tiempo fija siguiendo una serie en la que cada constante es el doble que la constante del ciclo anterior comenzando por 0,1 segundos de tiempo de polarización.

Tabla 15 Tiempo de carga en empleado en cada ciclo.

Ciclo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Tiempo de carga (sg)	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	51,2	102,4	204,8	408,6	819,2

La obtención de estos parámetros se ha realizado empleando un proceso iterativo, mediante el cual son ajustados los valores de las ramas RC minimizando el error entre la respuesta del sistema simulado y la respuesta obtenida en el ensayo sobre un transformador real. El sistema emplea un método iterativo que consta de los siguientes pasos.

1. Se emplea un circuito equivalente de Debye con una única rama de polarización que determina el valor de C_n que confluirá con el valor de la respuesta RVM del ensayo real, como se muestra en la figura 75 existen 14 curvas cada una calculada con una única rama para que ajuste con el valor correspondiente de la curva RVM obtenida en el ensayo, con lo que obtenemos un vector con 14 valores [$C_1 \dots C_{14}$]. Este vector sería el resultado final si no interactuasen las distintas ramas de polarización. Sin embargo, la interacción de las 14 ramas hará que el resultado diste mucho del valor obtenido en el ensayo en campo (figura 76).

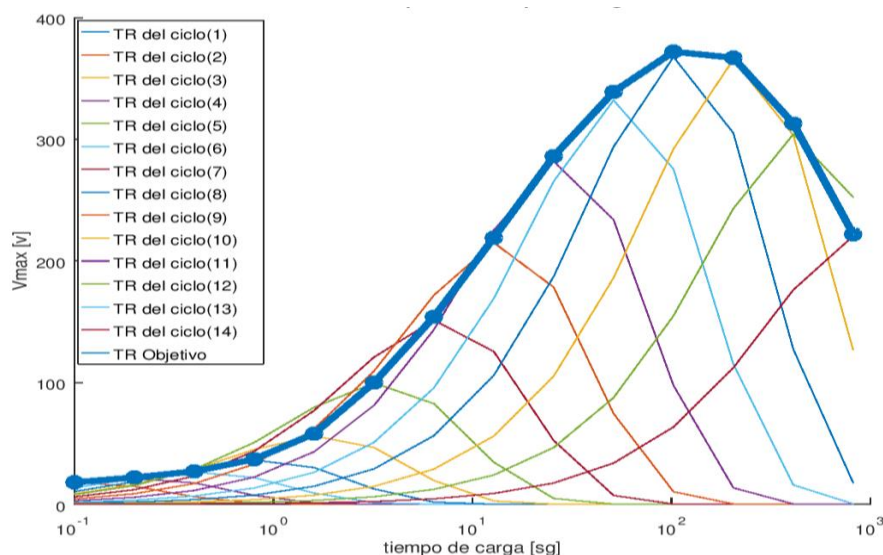


Figura 75 TR reabsorción ajustada a partir de una sola rama para ajustar únicamente al valor de tensión del punto correspondiente del ensayo RVM

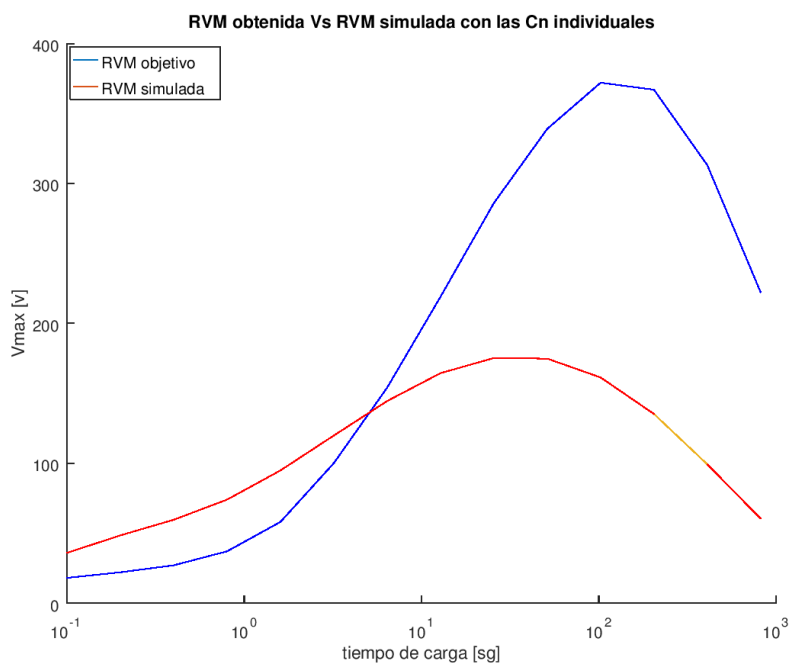


Figura 76 Resultado de simular las 14 Cn calculadas de manera conjunta frente a la curva obtenida en el ensayo RVM real

2. Mediante un proceso iterativo partiendo del vector de 14 Cn obtenidas en el primer paso son ajustados los valores de las 14 Cn que componen las 14 ramas de polarización del circuito equivalente de manera proporcional al error entre el valor obtenido en el ensayo RVM y la respuesta del circuito equivalente, proceso que concluye cuando el error se ha minimizado.

El error entre la respuesta real y la respuesta simulada mediante el circuito equivalente se calcula en base a un parámetro denominado “distancia”, este parámetro es el máximo del valor absoluto del log10 de la relación entre la curva objetivo y la curva obtenida.

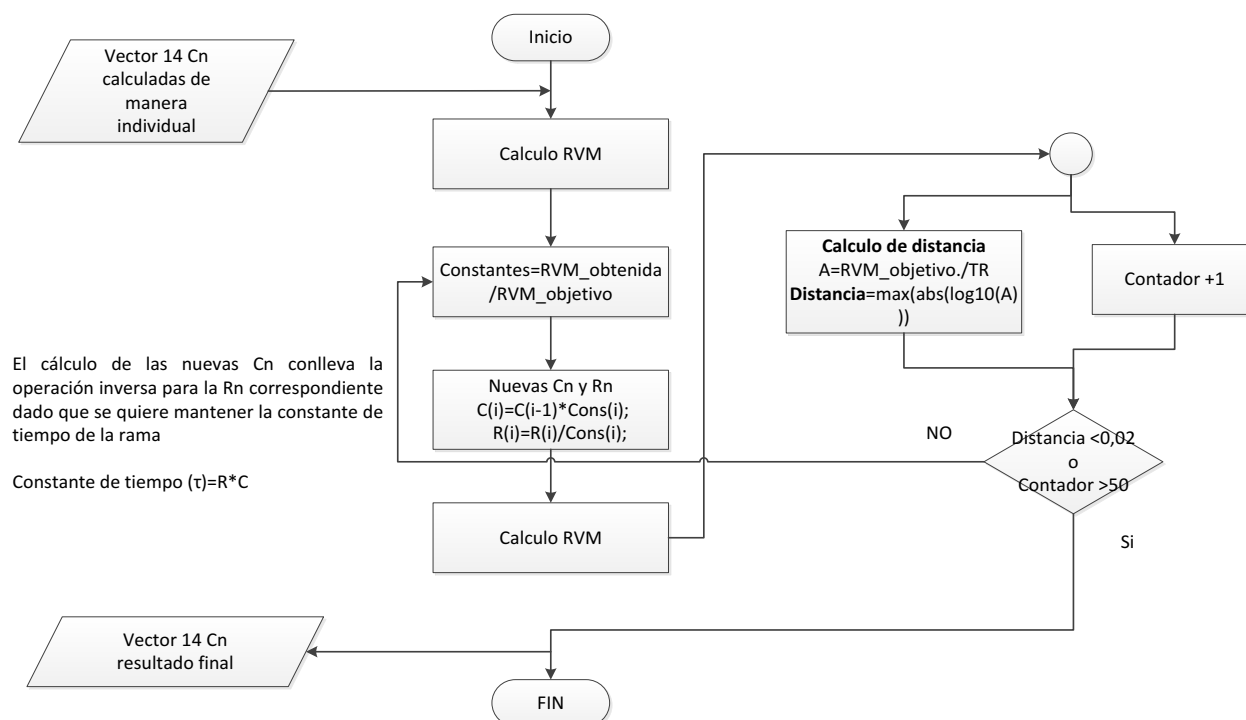


Figura 77 Diagrama de flujo algoritmo de ajuste de curvas RVM

En las siguientes imágenes puede observarse ver un ejemplo de cómo convergen la respuesta de la RVM simulada respecto a la RVM objetivo o real (figura 78), en el caso que estamos empleando como ejemplo fueron necesarias 16 iteraciones, desde la respuesta inicial representada en la figura 76.

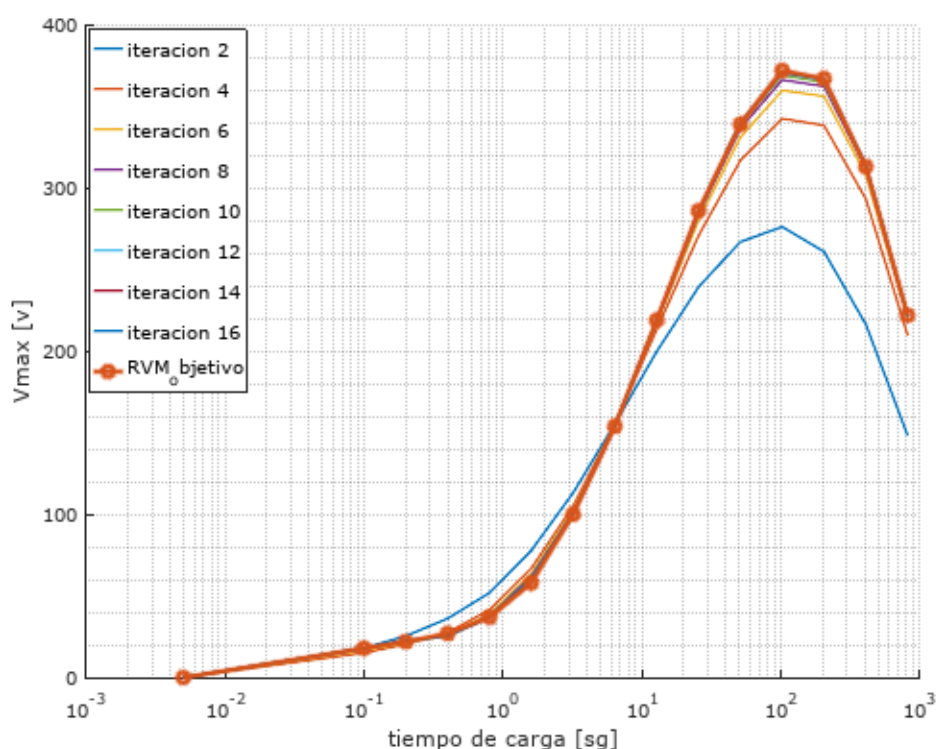


Figura 78 Evolución de la RVM simulada hasta que converge con la RVM objetivo (solo se han representado las iteraciones pares para facilitar la lectura del gráfico)

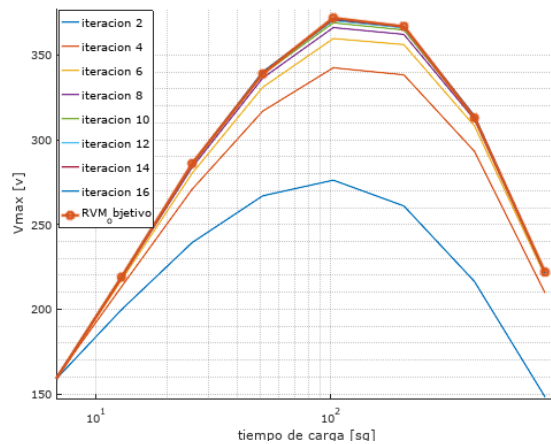


Figura 79 Detalle puntos del 8 al 14

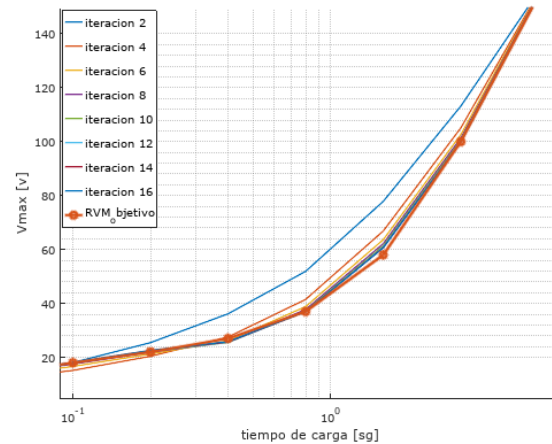


Figura 80 Detalle puntos del 1 al 7

6.2 (Validación del algoritmo) Test con otros métodos planteados en otros artículos

Dado que ha sido desarrollado un algoritmo que partiendo de los valores que definen el modelo extendido de Debye realiza una simulación del espectro de RVM que se obtendría derivado de dicho circuito, existe la necesidad de validar el algoritmo desarrollado y la bondad de los resultados obtenidos, para alcanzar esta meta ha sido realizada una comparativa entre simulaciones publicadas [30], [34] y [40] en las que los autores hayan indicado el valor de todas las ramas y la misma simulación realizada a partir del algoritmo desarrollado en este trabajo.

En base a la comparativa realizada entre métodos, ha sido posible observar que existen coincidencias en el resultado obtenido entre los autores citados y el resultado obtenido empleando el algoritmo desarrollado en dos de los tres casos, si bien en el caso en el que la coincidencia no es plena sí que puede ser observado que morfológicamente la curvas son semejantes y que ambas curvas mantienen trayectorias paralelas y se encuentran separadas por un offset. En la práctica es necesario indicar que no es posible coincidir con los tres autores citados dado que Zhang Tao en [30] y Saha en [40] presentan los mismos datos obteniendo diferente resultado.

El índice de los casos estudiados es el siguiente:

- Comparativa con los valores del artículo: Modeling of Polarization in Oil-Paper Insulation Using Recovery Voltage Measurements [33], en el que no se observan diferencias reseñables entre ambos métodos.
- Comparativa con los valores del artículo: Modelling and Calculation for Dielectric Response Circuit of Oil-Paper Insulation Transformers [29], en el que el ajuste de ambas respuestas la del artículo y la obtenida no muestran diferencias reseñables.
- Comparativa con los valores del artículo: Deriving an Equivalent Circuit of Transformers Insulation for Understanding the Dielectric Response Measurements, en este caso existe la citada diferencia entre curvas obtenidas y presentadas en el artículo, si bien como ya ha sido indicado con anterioridad las curvas para los mismos parámetros varían entre sendos autores.

Posterior al estudio de los casos será presentado un análisis en conjunto de los resultados.

6.2.1 Comparativa con los valores del artículo: Modeling of Polarization in Oil-Paper Insulation Using Recovery Voltage Measurements [34]

Del artículo “Modeling of Polarization in Oil-Paper Insulation Using Recovery Voltage Measurements” publicado por Božidar Filipovic-Grcic, Dalibor Filipovic-Grcic e Ivo Uglešić se obtienen las figuras 5 y 6 las cuales se adjuntan literales (figura 81 y figura 82 respectivamente).

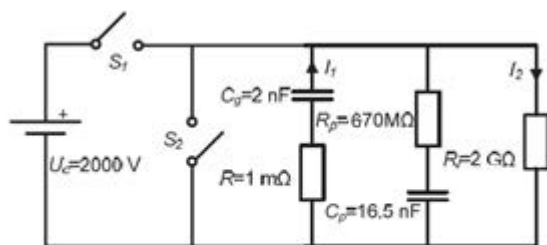


Fig. 5. Measuring circuit used for testing of the calculation method (marked current directions are valid only for phase 3)

Figura 81 Representación de la figura 5 extraída del artículo citado [34], en la que se muestran los valores de todos los componentes del circuito equivalente empleados para simular la respuesta RVM

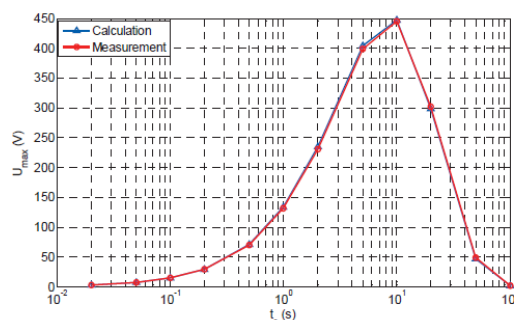


Figura 82 Resultado de la medida y la simulación en base a los parámetros calculados del espectro de polarización del ensayo presentado en el artículo citado [34]

En este caso se ha obviado la resistencia de 1 mili-ohmio que los autores plantean en serie con el condensador C_g , dado que el modelo empleado en este documento no contempla la existencia de esta resistencia, si bien como se observa en el resultado obtenido dentro del rango 0,1 segundos 819,2 segundos este es más que satisfactorio.

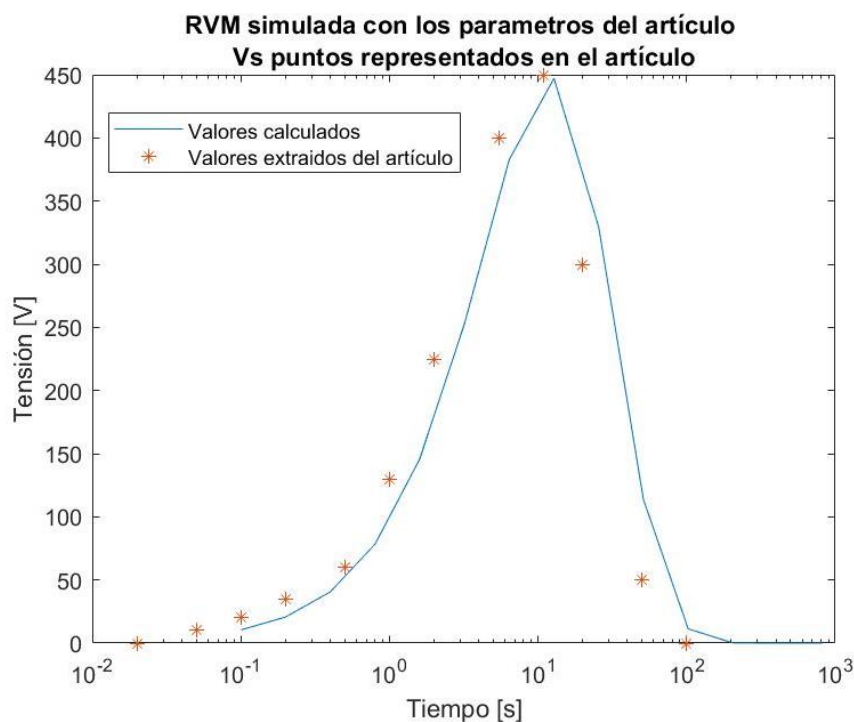


Figura 83 Representación de la respuesta RVM empleando los parámetros del circuito equivalente presentado en la Figura 81, puede observarse cómo el resultado se ajusta al resultado obtenido por los autores en [34], y presentado en la Figura 82.

6.2.2 Comparativa con los valores del artículo: Modelling and Calculation for Dielectric Response Circuit of Oil-Paper Insulation Transformers [30]

Del artículo “Modelling and Calculation for Dielectric Response Circuit of Oil-Paper Insulation Transformers” publicado por Zhang Tao y Yang Wen-Yan se han extraído la tabla I y la figura 5 los cuales se adjuntan literales.

TABLE I THE VALUES OF EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETER

Branches	Circuit parameters of test transformer	
	$R_{pi} (G\Omega)$	$C_{pi} (nF)$
1	70.0	68.0
2	30.0	22.0
3	9.0	18.0
4	13.0	3.5
$R_0 (G\Omega)$	140.0	
$C_0 (nF)$	3.3	

Figura 84 Tabla con los valores de los componentes del circuito equivalente empleado por los autores y presentado en el artículo [30]

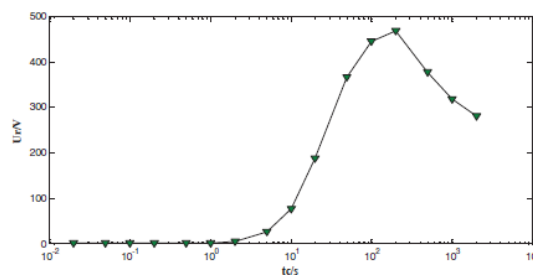


Figure 5. Polarization spectrum of test transformer

Figura 85 Figura que ilustra el artículo y representa el espectro de polarización obtenido en base a los parámetros indicados por los autores [30]

En base a estos datos ha sido llevada a cabo una simulación mediante el algoritmo desarrollado con objeto de comprobar si se obtienen los mismos resultados, la gráfica obtenida con los parámetros que se muestran en la Figura 84 se superpone con la gráfica obtenida Figura 85 mediante la simulación, dado que en la publicación no se adjunta una tabla con los valores de los puntos obtenidos de una manera visual se han estimado los valores representados por los autores a fin de poder superponer ambas representaciones.

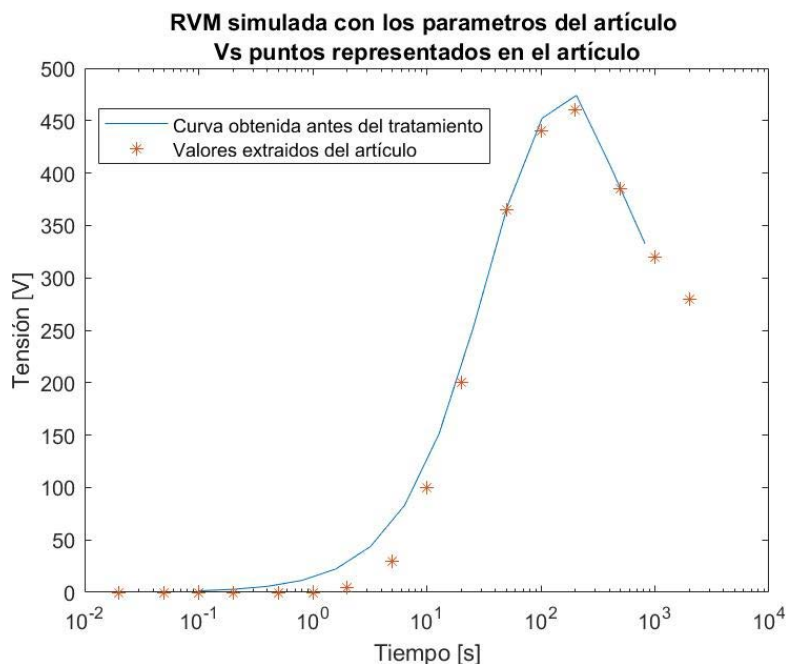


Figura 86 Espectro obtenido con los parámetros empleados en el artículo citado [30] empleando el algoritmo desarrollado para este trabajo.

Se puede comprobar cómo el resultado obtenido coincide tanto en morfología como en valores con el resultado obtenido por los autores del artículo “Modelling and Calculation for Dielectric Response Circuit of Oil-Paper Insulation Transformers”.

6.2.3 Comparativa con los valores del artículo: Deriving an Equivalent Circuit of Transformers Insulation for Understanding the Dielectric Response Measurements [40]

Del artículo “Deriving an Equivalent Circuit of Transformers Insulation for Understanding the Dielectric Response Measurements” publicado por K. Saha, Prithwiraj Purkait y Frank Müller se han obtenido la tabla III y la figura 18 los cuales se adjuntan literales.

EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETER VALUES BEFORE AND AFTER OIL RECLAMATION				
Branch	Before oil-reclamation		After oil-reclamation	
	R_i (G Ω)	C_i (nF)	R_i (G Ω)	C_i (nF)
1	58.0	83.0	70.0	68.0
2	29.0	26.5	30.0	22.0
3	11.5	14.5	9.0	18.0
4	2.5	17.0	13.0	3.5
5	1.5	9.5	34.0	0.1
6	2.5	0.15	21.0	0.02
R_0 (G Ω)	81.0		140.0	
C_0 (nF)	3.34		3.3	

Figura 87 Tabla con los valores de los componentes del circuito equivalente empleado por los autores y presentado en el artículo [40]

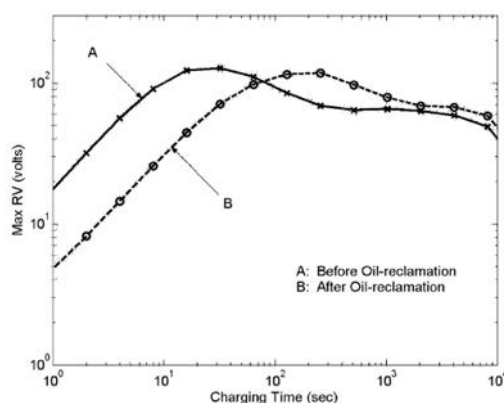


Fig. 18. RV spectra before and after oil reclamation.

Figura 88 Figura que ilustra el artículo y representa los espectros de polarización obtenido en base a los parámetros indicados por los autores [40]

En base a estos datos ha sido realizada una simulación mediante el algoritmo desarrollado para comprobar si se obtienen los mismos resultados, la gráfica obtenida con los parámetros que se muestran en la figura 87, el resultado de dicha simulación es el siguiente.

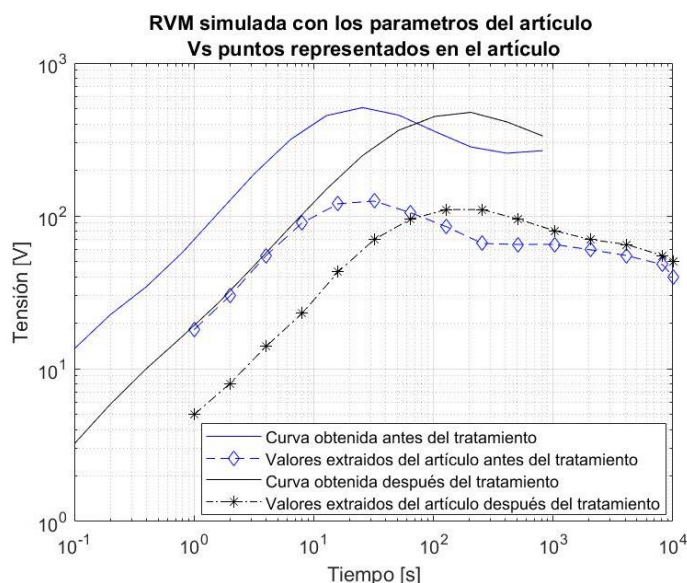


Figura 89 Espectro obtenido con los parámetros empleados en el artículo citado.

Los resultados obtenidos coinciden con los mostrados como resultado en el artículo si bien se puede observar que las líneas, aunque paralelas están desplazadas en el eje y, este desplazamiento puede ser debido a que no se ha modelado correctamente el efecto de R_g y/o C_g dado que la morfología de la curva se mantiene y transcurren paralelas, efecto tratado en los apartados 5.2.1 y 5.2.2.

Dado que la curva empleada para después del tratamiento es la misma que la empleada en el artículo “Modelling and Calculation for Dielectric Response Circuit of Oil-Paper Insulation Transformers” presentado en el epígrafe anterior, se ha resuelto que tan solo se trata de una diferencia en la obtención del valor de la tensión, pero no desvirtúa aspectos como la obtención en de curvas morfológicamente iguales y la interacción entre ramas del circuito.

Para complementar ese test se compararán el valor obtenido en ambas simulaciones dado que como se puede apreciar en la tabla 16 en este caso se han empleado 6 ramas en lugar de cuatro que se empleaban en el primer caso que se ha estudiado, estas ramas tampoco muestran una gran afección ya que como se puede ser observado el valor de los componentes C_5 y C_6 es muy pequeño por lo que no almacenan excesiva energía, aunado con que son constantes de tiempo muy bajas $\tau_5=3,4$ segundos y $\tau_6=0,42$ segundos.

A modo de ejemplo y siguiendo con lo explicado en el epígrafe 5.2.3.1 en el que se explica la influencia de las ramas con constante de tiempo baja sobre el global del espectro de RVM se han simulado ambas curvas expresadas en sendos artículos citados [30] y [40] una con 6 ramas y otra con 4 ramas, siendo estas las indicadas en la siguiente tabla (tabla 16).

Tabla 16 Parámetros empleados en sendos dos artículos para la misma curva.

RAMA	RVM1		RVM2	
	Ri (Gohm)	Ci (nF)	Ri (Gohm)	Ci (nF)
1	70	68	70	68
2	30	22	30	22
3	9	18	9	18
4	13	3,5	13	3,5
5	34	0,1		
6	21	0,02		

El resultado como se ha adelantado no muestra grandes variaciones dado que las ramas de tiempos bajos son las que muestran la mayor variación, de igual manera dado que las capacidades respectivas de las ramas 5 y 6 muestran un tan reducido valor (Tabla 16) apenas han tenido una influencia del entorno a los 2 voltios, como se muestra en la figura 90.

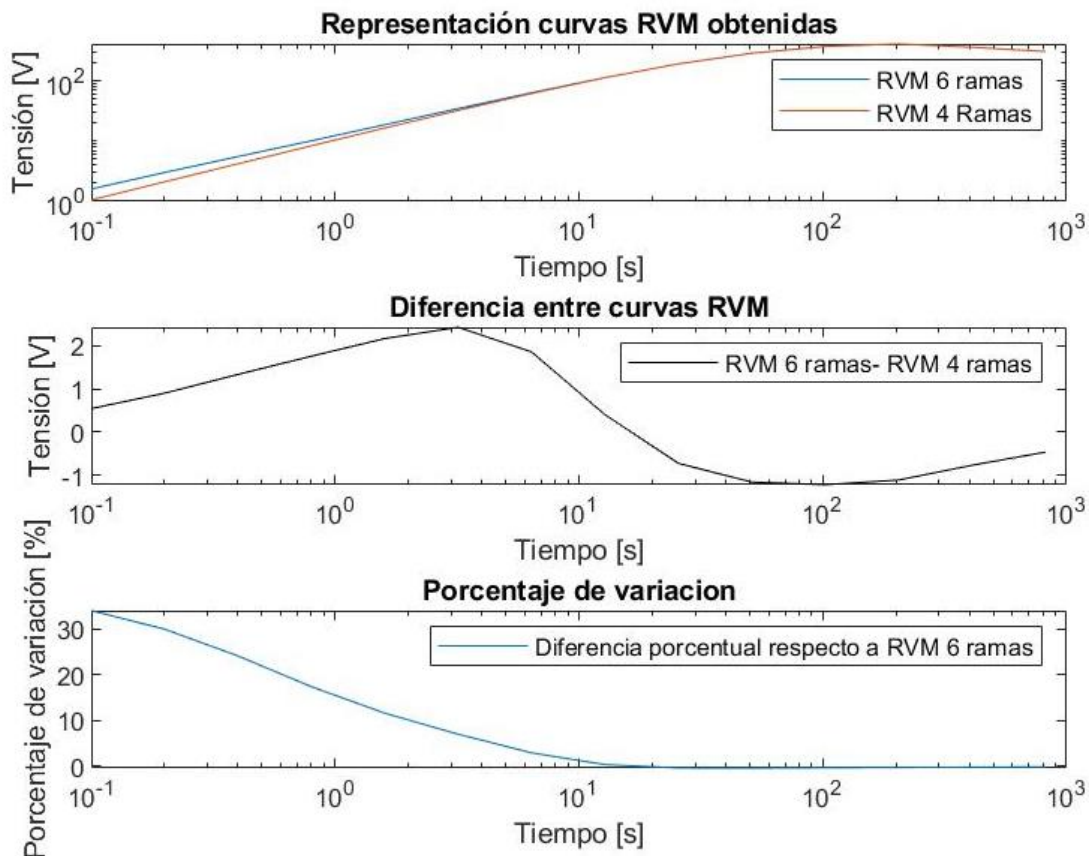


Figura 90 Superposición y diferencia de las curvas publicadas empleando 6 o 4 ramas.

6.2.4 Conclusión de la validación

A la vista de los resultados obtenidos, se puede inferir que el algoritmo trabaja correctamente dado que se han obtenido valores similares a los publicados por otros autores independientes unos de otros y que han empleado cada cual su propio algoritmo.

En los ejemplos de los apartados 6.2.2 y 6.2.3 se observa como los autores en un momento dado han empleado el mismo circuito de Debye salvo que uno de ellos ha empleado dos ramas adicionales las cuales hemos demostrado que no tienen especial transcendencia, sin embargo se ha podido comprobar que en ambos caso se obtiene una respuesta similar a la de ambos autores que a su vez es similar entre ellos, salvo por el offset resaltado que provoca que las curvas tengan un valor de tensión diferente a igual morfología. Importante es también la correlación con el artículo expuesto en el apartado 6.2.1 [34] dado que en este caso los autores emplean en lugar de un método numérico para ajustar su curva un árbol de decisión para encontrar los valores que mejor ajustan a la curva objetivo, con lo que se comprueba que el ajuste sigue siendo bueno aun cuando los parámetros han sido obtenidos por un procedimiento completamente diferente a los otros dos casos anteriores [30] y [40].

7 Ensayos realizados

Durante los últimos años han sido realizado los ensayos en campo que se van a ser empleados para realizar el estudio de sensibilidad que nos permitirá determinar que ramas del circuito equivalente que se ha desarrollado y descrito en el apartado 5 muestran sensibilidad a los diferentes procedimientos de mejora de condición del dieléctrico, empleando el algoritmo descrito en el apartado 0. Los ensayos han sido realizados sobre transformadores en servicio y en explotación normal, que en base a una su gama de mantenimiento predictivo y a los valores obtenidos en los ensayos fisicoquímicos del aceite se inicia el proceso de evaluación en profundidad del transformador.

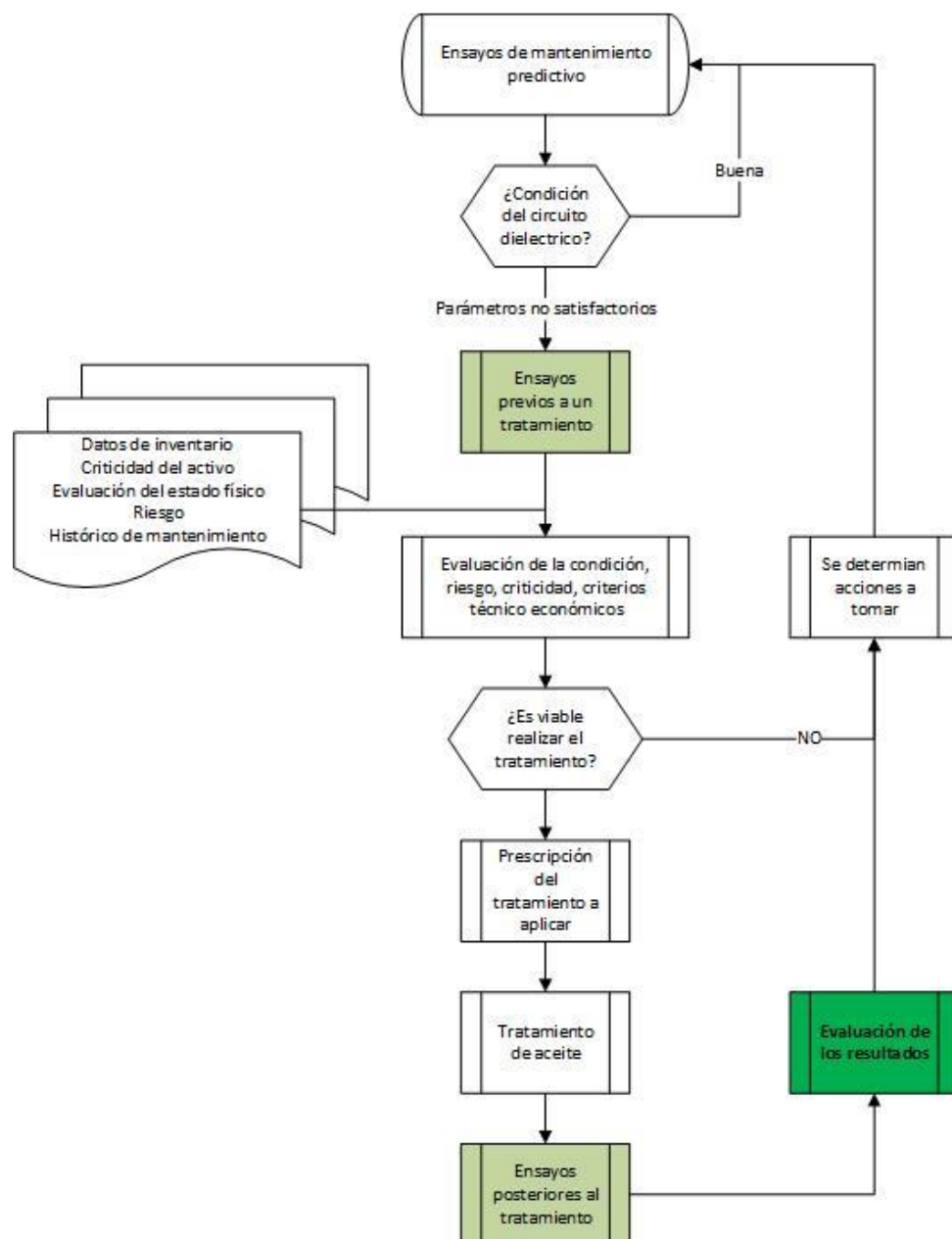


Figura 91 Diagrama de flujo seguido para la evaluación del circuito dieléctrico, valoración de la necesidad de actuación sobre el aceite y/o la parte activa y evaluación de los resultados.

Como se muestra en la figura 91, el procedimiento es iniciado cuando los valores obtenidos en los ensayos fisicoquímicos del aceite y/o los ensayos de mantenimiento predictivo rutinario arrojan valores no satisfactorios sobre la condición del circuito dieléctrico

del transformador. Una vez detectado un transformador con parámetros no satisfactorios se realizan los ensayos denominados “Ensayos previos a un tratamiento” de los que se toman:

- Tensión de reabsorción
- Capacidad y pérdidas dieléctricas de los devanados
- Resistencia de aislamiento
- Contenido en agua del aceite
- Factor de pérdidas dieléctricas del aceite
- Acidez
- Contenido en compuestos furánicos

A los resultados de los ensayos citados se le unen otros datos como pueden ser:

- Condición de la protección anticorrosiva del activo
- Condición de los accesorios del activo
- Histórico de mantenimiento
- Riesgo y criticidad del activo

En base a estos datos y a criterios técnico económicos se estima o se desestima realizar una intervención (tratamiento de aceite) sobre el transformador, en el caso de ser necesario se prescribirá un reacondicionado del aceite, un secado de la parte activa, o una regeneración del aceite, procesos descritos en los apartados 2.2.1 y 2.2.2.

Posterior al tratamiento prescrito sobre el aceite se realizarán nuevamente los ensayos citados anteriormente, denominados “Ensayos posteriores al tratamiento” con lo que se puede llevar a cabo el proceso denominado “Evaluación de los resultados” en la figura 91, todos los ensayos citados se emplean en la evaluación a excepción de los compuestos furánicos, los cuales se eliminan durante el tratamiento, por lo que son medidos para emplearlos como fingerprint o punto de partida y reiniciar el seguimiento. En este proceso de “Evaluación de los resultados” es en el que la mejora en la interpretación del ensayo de tensión de reabsorción es de especial interés.

7.1 Ensayos realizados

Los ensayos tanto “previos al tratamiento” como en los ensayos “posteriores al tratamiento”, en los casos en los que se determinó mediante el estudio de los ensayos previos al tratamiento en conjunto con el resto de datos disponibles del transformador, la necesidad de llevar a cabo un proceso de reacondicionado, han sido realizados procurando que las condiciones fueran lo más repetitivas posibles, siempre teniendo en cuenta que se trata de unos ensayos realizados en campo, supeditados a la explotación segura de los activos. Los ensayos realizados son una combinación de ensayos dieléctricos y ensayos fisicoquímicos del aceite.

7.1.1 Ensayos eléctricos

Los ensayos eléctricos realizados son:

- Capacidad y pérdidas dieléctricas de los devanados, ensayo realizado a 2 y 10kV a frecuencia de red siendo este ensayo conocido como tip-up y un ensayo realizado a 2kV con un barrido de frecuencias entre 15 y 400 Hz [31], estos ensayos se han realizado con un equipo CPC 100 + TD1 del fabricante OMICRON. [23]

- Tensión de reabsorción (RVM), para lo que se ha empleado el equipo UM2B del fabricante UNITRONICS [29]
- Resistencia de aislamiento medida durante la prueba de tensión de reabsorción, dado que en el ciclo 14 el equipo UM2 inyecta tensión durante 819,2 se emplean los primeros 600 segundos de inyección de tensión para medir la resistencia de aislamiento y obtener el índice de polarización del aislamiento, los 10 valores de resistencia obtenidos minuto a minuto serán empleados para extrapolar la resistencia del circuito equivalente de Debye.

Hay que resaltar que los tres ensayos eléctricos miden el circuito dieléctrico configurado de semejante manera.

Tanto en el ensayo con el equipo de reabsorción, en el que el devanado de baja tensión es cortocircuitado de manera manual a tierra, como en el ensayo de capacidad y pérdida de devanados en el modo GST (Ground Speciment Test) que será el propio equipo el que realice esta conexión automáticamente, el dieléctrico que se mide, el cual es caracterizado como un condensador, será el resultado de la capacidad en paralelo entre el devanado de alta tensión y tierra y la capacidad entre los devanados de alta tensión y baja tensión. La capacidad medida durante el ensayo de capacidad y factor de pérdidas dieléctricas o $\tan \delta$ en el modo GST inyectando por el devanado de alta tensión la cual se denomina CH+CHL en inglés o CA+CAB (figura 93) en castellano es la que será empleada como capacidad geométrica del circuito equivalente de Debye.

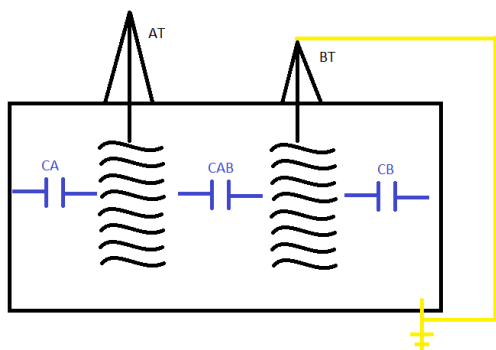


Figura 92 Esquema de capacidades de un transformador de dos devanados configurado para hacer el ensayo de tensión de reabsorción inyectando por alta tensión.

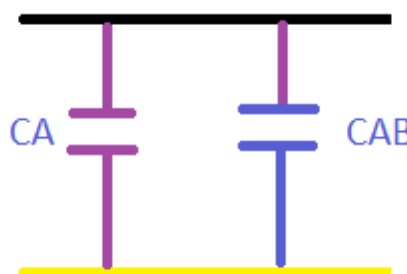


Figura 93 Circuito equivalente que deriva de la imagen contigua.

7.1.1.1 Procedimiento de ensayo capacidad y pérdidas dieléctricas o $\tan \delta$

7.1.1.1.1 Preparación

1. Aislar física y eléctricamente los terminales de las bornas de cada devanado, idealmente y para cumplir con las mejores prácticas nada debe permanecer en contacto con los terminales de las bornas.
2. Cortocircuitar los terminales de cada devanado, incluyendo la borna de neutro, si la borna de neutro o cualquier borna del terciario está habitualmente aterrizada ha de retirarse la puesta a tierra de la misma.
3. Verificar la correcta puesta a tierra de la cuba del transformador.

7.1.1.1.2 Procedimiento de ensayo

El procedimiento para realizar el ensayo de un transformador viene determinado por el número de devanados independientes que sean accesibles.

El objetivo es dividir el sistema de aislamiento en la mayor cantidad de secciones separadas y probarlas individualmente para maximizar la sensibilidad y aumentar las posibilidades de encontrar un defecto lo más incipiente posible, además de acotar lo máximo posible la zona en la que se encuentra.

7.1.1.1.3 Modos de prueba

Los distintos modos de prueba son el resultado de la automatización del ensayo de pérdidas dieléctricas, su función es aislar las porciones de aislamiento más pequeñas posibles y entender su significado hará que subsiguientemente permita comprender exactamente qué parte del aislamiento se está testando.

Existen tres modos UST, GST y GST guard, el modo UST es empleado para medir aislamientos en los que no interviene tierra, mientras que GST es empleado para la medida de aislamientos respecto a tierra, por último, el modo GST guard permite además de discriminar la medida de una parte del aislamiento.

Los equipos de ensayo están dotados de una matriz de relés que permiten con el mismo cableado exterior variar la configuración de prueba en función del modo de prueba a emplear.

Para comprender los modos de prueba es necesario partir de las siguientes premisas:

- Se requiere una diferencia de potencial para hacer que la corriente fluya
- La corriente intentará regresar a su fuente, esto se hace a través del terminal de guarda del equipo
- Toda la corriente regresará a su fuente empleando todos los caminos disponibles, un gran porcentaje volverá por el camino de menor resistencia.

7.1.1.1.4 GST

En el modo GST ninguno de los cables se conecta directamente al punto de guarda, por lo que la corriente proveniente de los cables de medida y que retorna a través de tierra será conducida a través del amperímetro que registrará las fugas.

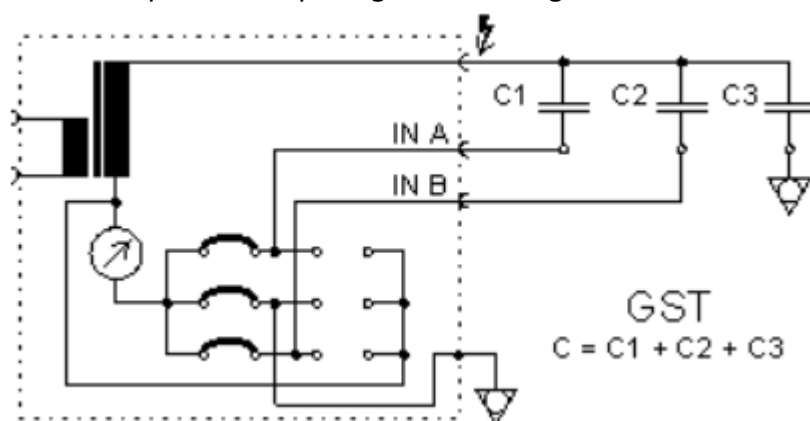


Figura 94 Modo de test GST [23]

- GST-Guard

El modo GST-Guard difiere del modo GST en que uno o los dos cables de medida (rojo o azul) pueden ser conducidos a través de guarda desechándose las pérdidas provenientes del aislamiento mediante dichos conductores, esta es una manera de discriminar áreas, para que

como ha sido explicado anteriormente conseguir medir las porciones más pequeñas de aislante posible.

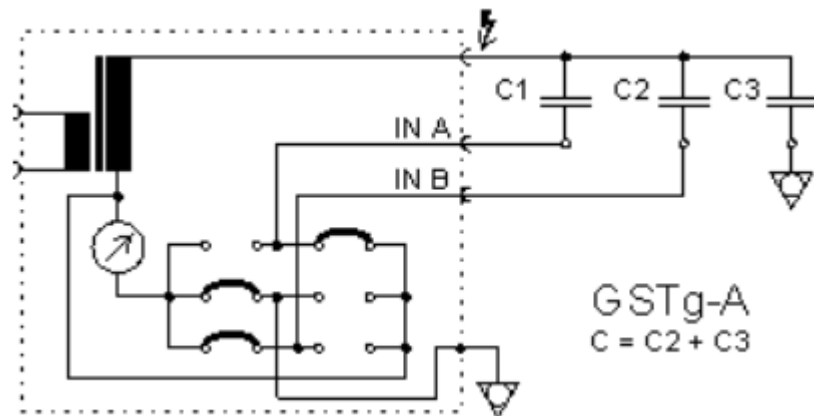


Figura 95 Modo de test GST-Guard [23]

- UST

En el modo de prueba UST el cable de guarda estará siempre puesto a tierra, y cualquier corriente de fuga del espécimen testado que fugue hacia tierra será desestimada. Este modo se emplea para medir aislamientos en los que ninguno de sus terminales está aterrizado como puede ser el aislamiento entre devanados o el aislamiento principal de una borna C1.

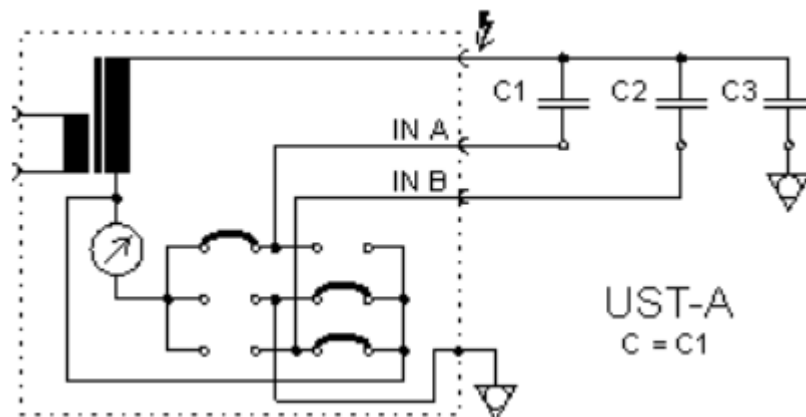


Figura 96 Modo de prueba UST [23]

7.1.1.1.5 Ensayos a realizar

Mediante los modos de prueba indicados en el apartado anterior mediremos todos los posibles aislamientos dentro de la estructura del transformador, los devanados se nombrarán como:

H: Alta tensión

L: Baja tensión

T: Terciario

Y los distintos aislamientos se nombrarán como CXY siendo X el devanado en el que se aplica tensión e Y el devanado respecto del que son medidas las pérdidas, en el caso de que no exista Y significará que la media es respecto a masa.

Ejemplos:

CHL: Se mide el aislamiento entre alta y baja tensión inyectando en AT y midiendo por BT

CLH: Se está midiendo el aislamiento entre alta y baja tensión inyectando en BT y midiendo por AT

CH: se mide el aislamiento entre el devanado de AT y masa

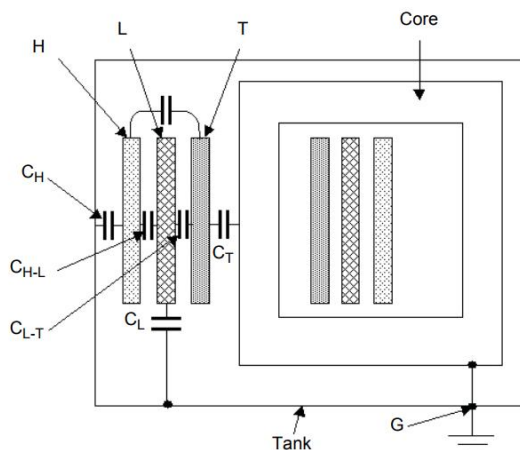


Figura 97 Capacidades en un transformador de 3 devanados [23]

- Transformadores de dos devanados

Tabla 17 Distintos modos de prueba y sus conexiones para ser empleadas en transformadores de dos devanados.

Modo de prueba	Aplicación de tensión	Tierra	Guarda	UST	Medida
GST-GROUND	AT	BT	---	---	CH+CHL
GST-GUARD	AT	---	BT	---	CH
UST	AT	---	---	BT	CHL
GST-GROUND	BT	AT	---	---	CL+CLH
GST-GUARD	BT	---	AT	---	CL
UST	BT	---	---	AT	CLH

Leyenda.

CH, capacidad alta /masa.

CHL, capacidad alta /baja.

CL, capacidad baja /masa.

CLH, capacidad baja/alta.

- Autotransformadores

Tabla 18 Distintos modos de prueba y sus conexiones para ser empleadas en autotransformadores transformadores con terciario.

Modo de prueba	Aplicación de tensión	Tierra	Guarda	UST	Medida
----------------	-----------------------	--------	--------	-----	--------

<i>GST- GROUND</i>	AT+BT	Terciario	---	---	CHL+CHLT
<i>GST- GUARD</i>	AT+BT	---	Terciario	---	CHL
<i>UST</i>	AT+BT	---	---	Terciario	CHLT
<i>GST- GROUND</i>	Terciario	AT+BT	---	---	CT+CTHL
<i>GST- GUARD</i>	Terciario	---	AT+BT	---	CT
<i>UST</i>	Terciario	---	---	AT+BT	CTHL

Leyenda:

CHL⁵, capacidad alta /baja.

CLH, capacidad baja/alta.

CT, capacidad terciaria /masa.

CHLT, capacidad alta baja/terciario.

CTHL, capacidad terciaria/alta baja.

- Transformadores de tres devanados

Tabla 19 Distintos modos de prueba y sus conexiones para ser empleadas en transformadores de tres devanados.

<i>Modo de prueba</i>	<i>Aplicación de tensión</i>	<i>Tierra</i>	<i>Guarda</i>	<i>UST</i>	<i>Medida</i>
<i>GST- GROUND</i>	AT	---	Terciario	---	CH+CHL
<i>GST- GUARD</i>	AT	---	BT y Terciario	---	CH
<i>UST</i>	AT	---	---	BT	CHL
<i>GST- GROUND</i>	BT	---	AT	---	CL+CLT
<i>GST- GUARD</i>	BT	---	AT y Terciario	---	CL
<i>UST</i>	BT	---	---	Terciario	CLT
<i>GST- GROUND</i>	Terciario	---	AT y BT	---	CT+CHT
<i>UST</i>	Terciario	---	---	AT	CHT

CH, capacidad alta /masa.

CHL, capacidad alta /baja.

CL, capacidad baja /masa.

CLH, capacidad baja/alta.

CT, capacidad terciaria /masa.

CHLT, capacidad alta baja/terciario.

⁵ Hay que tener en cuenta que en autotransformadores CHL no es la medida de la capacidad Alta Baja, HL se refiere al devanado del autotransformador que comprende el alta y la baja tensión, un autotransformador con terciario es equivalente a un transformador de dos devanados.

CTHL, capacidad terciaria/alta baja.

7.1.1.2 Procedimiento de ensayo de tensión de reabsorción [29]

Las conexiones serán realizadas cortocircuitando todas las bornas pertenecientes al mismo devanado, conformando así una placa del condensador, en los casos en los que existan más de dos devanados se unirán eléctricamente todos aquellos por los que no se inyecte conformando todos ellos el electrodo de referencia. Ejemplo: en un transformador de tres devanados se inyectará tensión por el devanado de más alta tensión cortocircuitando las bornas (1U, 1V, 1W y 1N) mientras que la placa de referencia la conformarán la baja tensión y el terciario por lo que se unirán eléctricamente las bornas (2U, 2V, 2W, 2N, 3U, 3V, 3W y 3N) además de esto se unirá la placa de referencia a tierra.

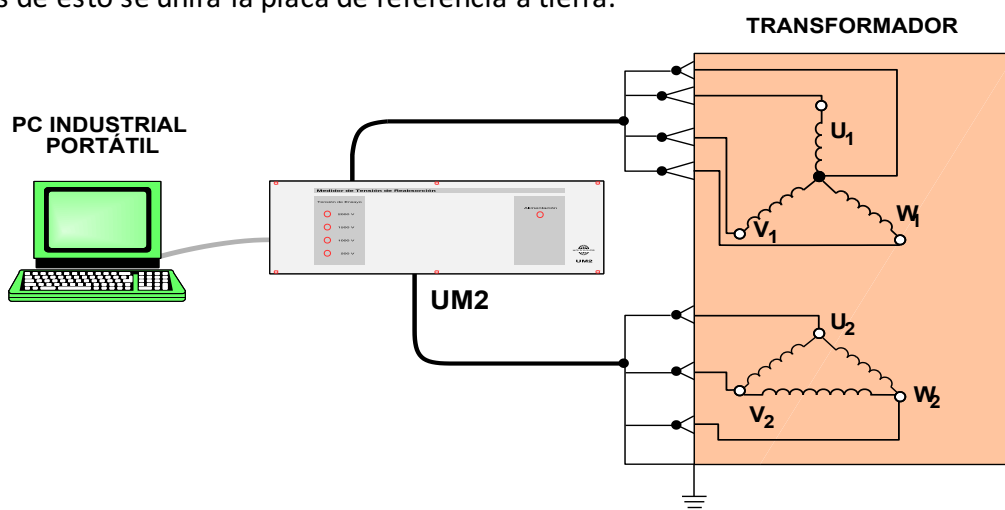


Figura 98 Ejemplo de cortocircuitado y conexionado para TP de dos devanados, atención a la puesta a tierra del electrodo de referencia [29]

Tabla 20 Modos de conexión en función del tipo de transformador.

TP dos bobinados	TP Tres bobinados	Autotransformadores
AT/BT+Masa	AT/BT+TERCIARIO+Masa	AT+BT/TERCIARIO+Masa

7.1.2 Ensayos fisicoquímicos del aceite

Para la realización de los ensayos de aceite la actuación en campo se limita a la toma de muestra, actividad que, aunque aparentemente simple ha de realizarse de acuerdo con la norma IEC 60475 [50] edición aplicable en el momento de la toma de la muestra.

La toma de muestra ha sido realizada empleando botes de cristal de topacio y de acuerdo con el procedimiento del apartado 4.2.5 de la norma IEC 60475:2011 [50]

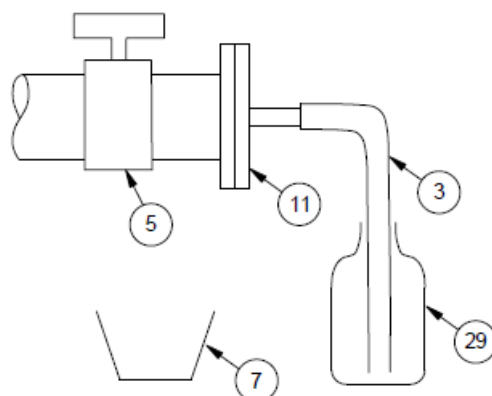


Figura 99 Figura 7a de la norma IEC60475:2011 "Example of sampling by bottle"

Una vez tomada la muestra los ensayos físico-químicos del aceite se han realizado en base a las siguientes normas:

Tabla 21 Ensayos FQ aplicados y norma que les corresponde

<i>Prueba</i>	<i>Norma aplicable</i>
Agua (Karl Fischer)	UNE-EN 60814
Factor de disipación dieléctrica ($\tan \delta$ a 90°C)	UNE-EN 60156
Color	UNE 21320/3
Acidez (Índice de neutralización)	UNE-EN 62021-1
Contenido en compuestos furánicos	UNE-EN 61198

7.2 Resultados obtenidos

En esta sección van a ser presentados los resultados obtenidos a partir los ensayos realizados en campo, y el valor de los parámetros del circuito equivalente de Debye inferidos a partir de los resultados obtenidos en los ensayos, así como los valores de los resultados de las analíticas de aceite realizadas.

En total han sido realizados ensayos sobre 22 transformadores de potencia, sobre algunos de los cuales se ha realizado más de un tratamiento, totalizándose 33 experiencias, y dado que carece de interés para el objeto de este documento no será indicado ni el fabricante, ni el nº de serie de los transformadores, habiendo sido estos numerados de forma correlativa.

A continuación, se presenta una tabla resumen (tabla 22) de cada uno de los transformadores y el tratamiento al que se ha sometido junto con las características técnicas más importantes para los fines de este documento de estos.

Tabla 22 Listado de equipos ensayados y proceso llevado a cabo en cada uno de ellos.

Nº de TP	Prueba	Peso del aceite [kg]	Año de fabricación	Tensiones [KV]	Potencia [MVA]	Proceso llevado a cabo
1	1	5000	1971	21,5/11	5,4	Reacondicionado
2	1	27200	1961	132/33	35	Reacondicionado
3	1	37350	1960	132/45	60	Regenerado
3	2	37350	1960	132/45	60	Regenerado +1 año
4	1	7000	1984	45/13,8	10	Envejecimiento
4	2	7000	1984	45/13,8	10	Regeneración + secado parte activa
5	1	18000	1971	220/66	30	Regenerado
6	1	20000	1978	132/21,5	40	Secado parte activa
6	2	20000	1978	132/21,5	40	Secado parte activa
7	1	19000	1985	132/21,5	40	Secado parte activa
8	1	13000	1986	132/21,5	40	Secado parte activa
8	2	13000	1986	132/21,5	40	Secado parte activa
8	3	13000	1986	132/21,5	40	Secado parte activa
8	3	13000	1986	132/21,5	40	Secado parte activa + 1 año
9	1	5680	1991	30/13,8	10	Regenerado
10	1	20000	1992	132/21,5	40	Secado parte activa
10	2	20000	1992	132/21,5	40	Regenerado
11	1	13500	1978	66/20	20	Regenerado
12	1	5600	1972	66/13,8	4,5	Regenerado
12	1	5600	1972	66/13,8	4,5	Regenerado
13	1	7650	1975	30/13,8	10	Regenerado
14	1	6141	1981	45/21,5	6,3	Cambio de aceite
15	1	5200	1976	45/13,8	6,3	Cambio de aceite
16	1	5800	1978	45/13,8	6,3	Regenerado
16	2	5800	1978	45/13,8	6,3	Regenerado
17	1	4050	1963	46/13,8	10	Envejecimiento
18	1	5600	1972	66/13,8	4,5	Regenerado
18	2	5600	1972	66/13,8	4,5	Regenerado

19	1	7800	1970	45/15,7	12	Regenerado
20	1	5800	1978	45/13,8	6,3	Regenerado
21	1	31000	1978	132/66	80	Regenerado
22	1	6350	1976	30/13,8	6	Regenerado

La columna “Proceso llevado a cabo” será en la que se indique qué tratamiento se ha lleva a cabo en el transformador y en base al tratamiento realizado serán correlacionados, los resultados obtenidos en los ensayos de aceite, con los resultados obtenidos en el ensayo RVM y los cuales serán evaluados con respecto a los resultados teóricos esperables.

El resultado teórico esperable en base a la descripción de los tratamientos realizada en el apartado 2.2 será el siguiente:

- **Reacondicionado:** El reacondicionado el aceite busca deshidratar el mismo, consiste en realizar varios ciclos en los que se hace circular el aceite por una cámara donde se calienta y es aplicado vacío con el fin de evaporar y extraer la humedad. Es un procedimiento aplicable cuando se requiere extraer el agua solo del aceite, como podría ser en un tratamiento de llenado de un transformador nuevo en el que los bobinados han sido secados en fábrica o un transformador que se ha trasladado y en cuyo historial existen indicios de que hubiera estado hidratado.

Los resultados esperables son un descenso del valor de agua medido en el aceite, aunque una vez el aceite se ha deshidratado este se torna hidrófilo solo si el proceso de reacondicionado es muy prolongado en el tiempo una pequeña parte del agua contenida en el aislamiento celulósico será extraída, por lo que no se esperan mejoras reseñables en el secado del papel, en lo relativo a compuestos polares y partículas disueltas en el aceite (a excepción del agua) no se esperan variaciones reseñables dado que el aceite no es filtrado.

- **Secado de parte activa:** El procedimiento llevado a cabo en los transformadores en los que se indica que se ha realizado un secado de parte activa es el denominado “*Circulación de aceite, con ciclos de vacío*” descrito en el apartado 2.2.1, por una combinación de coste-tiempo-eficiencia es el que se ha considerado como más ventajoso y práctica habitual en las utilities españolas. Este tratamiento en base al calentamiento de la parte activa y la aplicación de vacío a la misma, es muy eficiente para extraer la humedad del aislamiento celulósico del transformador, la cual es extraída en forma de vapor de agua y absorbida por la bomba de vacío o bien absorbida por el aceite deshidratado el cual volverá a ser deshidratado en el siguiente ciclo.

Los resultados esperables son a nivel aislante líquido, aceite, los mismos que en el procedimiento de reacondicionado, sin embargo, la diferencia radica en que los resultados observables en el estado del aislamiento celulósico, los cuales no son medibles mediante ensayos en el aceite, pero si por métodos de espectroscopía dieléctrica como son RVM, PDC o FDS. Igualmente, con posterioridad a la puesta en servicio es posible observar otra evidencia de la extracción de humedad del papel, dado que no se dará un aumento del contenido en agua del aceite producto de la migración de agua del papel al aceite como consecuencia del aumento de temperatura de la parte activa.

- **Regeneración:** Tal y como se ha descrito en apartado 2.2.2 este tratamiento consiste en hacer circular el aceite a través de una serie de filtros mecánicos y de tierras polares (filtros químicos) mediante los cuales son extraídos del aceite compuestos polares y partículas disueltas, como norma general el tratamiento de regeneración y dado que las tierras de Fuller aportan humedad al aceite es práctica habitual finalizar el tratamiento de regeneración realizando un reacondicionado del aceite para eliminar esa humedad aportada.

Los resultados esperables son una reducción del factor de pérdidas dieléctricas, y un aumento de la tensión de ruptura dieléctrica, al mismo tiempo disminuirá la acidez del aceite y el número de color, estos dos puntos no pueden ser estudiados con técnicas de espectroscopía dieléctrica, si bien las técnicas de espectroscopía dieléctrica son sensibles a la polarización interfacial provocada por los lodos y contaminantes depositados en los bobinados que al no estar disueltos en el aceite no son medibles mediante ensayos físico químicos.

- **Cambio de aceite:** El procedimiento de cambio de aceite es quizás el más profundo, también el más costoso y el menos ecológico al generarse un gran volumen de residuo que ha de ser gestionado. El procedimiento propiamente dicho consiste en vaciar el transformador, dejar reposar entre 24 y 48 horas para que el aceite de impregnación de las bobinas escurra y pueda ser recuperado, a partir de este punto se empleará un aceite de sacrificio para chorrear las bobinas y arrastrar lodos y partículas adheridas, esta limpieza es más exhaustiva que la que se realiza durante una regeneración ya que el arrastre de lodos y partículas es más eficiente, por último se aplica vacío para extraer la humedad y se rellena el transformador con aceite nuevo y tratado.

Los resultados esperables son equivalentes a los esperables en un proceso de regeneración, pero mucho más profundos, dado que un aceite nuevo tiene unas características mejores que uno regenerado por norma general, el secado ha sido más exhaustivo y la limpieza de la superficie de las bobinas más eficiente.

- **Envejecimiento y regeneración +1:** Estos dos puntos dentro de los “procesos llevados a cabo” no son procesos realizados de manera voluntaria si no que son procesos espontáneos que se pueden catalogar ambos como la inversa de la regeneración dado que se toma la situación de partida del transformador y se estudia su evolución con el paso del tiempo, o bien un transformador regenerado se vuelve a estudiar un año después, siendo en estos caso el estudio previo en el que está en mejor condición el transformador y el posterior en el que se encuentra en peor condición.

Los resultados esperados son un aumento de las pérdidas dieléctricas, de la humedad y de la acidez, propios del envejecimiento de un transformador.

7.3 Equipos de prueba empleados

Para todos los ensayos se han empleado equipos de ensayo comerciales de acuerdo a los modos de configuración que a continuación se listan:

Tabla 23 Listado de transformadores ensayados y los equipos y configuraciones empleados para los ensayos.

Nº de TP	Prueba	Equipo RVM	Configuración del ensayo ¹	Equipo de C & Fp	Configuración del ensayo ²	Tipo Tp
1	1	Unitronics UM2B	AT+bt/tierra	Omicron CPC100	GST	Auto transformador sin terciario
2	1	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados
3	1	Unitronics UM2B	AT/bt+terciario +tierra	Omicron CPC100	GST	TP tres devanados
3	2	Unitronics UM2B	AT/bt+terciario +tierra	Omicron CPC100	GST	TP tres devanados
4	1	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Doble M4000	GST	TP dos devanados
4	2	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados
5	1	Unitronics UM2B	AT+bt/ terciario + tierra	Omicron CPC100	GST	Auto transformador con terciario
6	1	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados
6	2	Unitronics UM2B	bt/AT+tierra	Omicron CPC100	GST (prueba por bt)	TP dos devanados
7	1	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados
8	1	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados
8	2	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados
8	3	Unitronics UM2B	bt/AT+tierra	Omicron CPC100	GST (prueba por bt)	TP dos devanados
8	3	Unitronics UM2B	bt/AT+tierra	Omicron CPC100	GST (prueba por bt)	TP dos devanados
9	1	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados
10	1	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados
10	2	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados
11	1	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados
12	1	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados
12	2	Unitronics UM2B	bt/AT+tierra	Omicron CPC100	GST (prueba por bt)	TP dos devanados

13	1	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados
14	1	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados
15	1	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados
16	1	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados
16	2	Unitronics UM2B	bt/AT+tierra	Omicron CPC100	GST (prueba por bt)	TP dos devanados
17	1	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados
18	1	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados
19	1	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados
20	1	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados
21	1	Unitronics UM2B	AT+bt/ terciario + tierra	Omicron CPC100	GST	Auto transformador con terciario
22	1	Unitronics UM2B	AT/bt+tierra	Omicron CPC100	GST	TP dos devanados

¹- Se indica el devanado por el que se inyecta tensión separado por “/” de los devanados que se referencian a tierra.

²- En todos los casos se inyecta por el devanado de alta tensión, salvo en aquellos casos explícitamente indicados.

7.4 Representación de los resultados

Los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos realizados serán presentados uno a uno siguiendo la siguiente sistemática.

1º Descripción del transformador, del tratamiento realizado y análisis de los resultados.

2º Panel de mando con los resultados representados, así como el graficado de las series más representativas.

El panel de mando diseñado es el siguiente

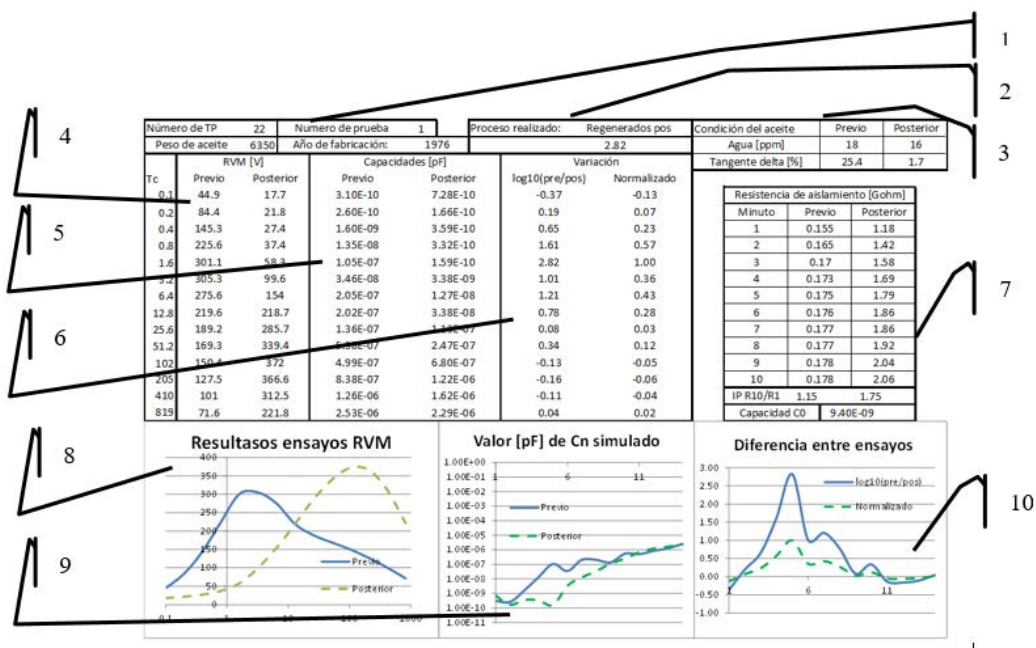


Figura 100 Panel de mando tipo para todos los ensayos, y sus distintos contenidos.

- 1- Datos identificativos de la prueba y datos del transformador
- 2- Detalle del proceso llevado a cabo sobre el aceite
- 3- Resultado de las analíticas de aceite de contenido en agua y factor de pérdidas dieléctricas
- 4- Resultado del ensayo de RVM obtenido en las pruebas previas y posteriores al tratamiento
- 5- Valor de las capacidades obtenidas en el circuito equivalente para las 14 ramas simulado el ensayo previo y posterior al tratamiento, el valor de la resistencia de cada una de las ramas no se ha implementado en el cuadro de mando al ser este un valor que depende del tiempo de carga y del valor de la capacidad. $R_n = T_{cn} / C_n$
- 6- Variación de las capacidades entre los circuitos equivalentes previo y posterior, se representan el valor relativo en escala logarítmica en base 10 y el valor normalizado en función del máximo obtenido en la columna $\log_{10}(C_{pre}/C_{pos})$, este valor normalizado el que se empleará para los estudios de conjuntos de transformadores.
- 7- Resultado de los ensayos eléctricos realizados en las pruebas de resistencia de aislamiento minuto a minuto que se empleará para interpolar el valor de R_0 y valor de la capacidad C_0 medida en el ensayo de capacidad y factor de pérdidas dieléctricas.
- 8- Representación de los resultados de los ensayos previos y posteriores al tratamiento del ensayo RVM se emplea la representación tradicional $V_{max}/Tiempo$ de carga.
- 9- Representación del valor de C_n de cada una de las 14 ramas de los circuitos equivalentes obtenidos previos y posteriores al tratamiento.
- 10- Representación de la relación entre los resultados previos y posteriores al tratamiento, se representa para cada una de las 14 ramas del circuito equivalente la relación $\log_{10}(C_{pre}/C_{pos})$ y el valor normalizado empleando como base el valor máximo de la relación $\log_{10}(C_{pre}/C_{pos})$.

7.4.1 Transformador 1 ensayo 1

Se trata de un transformador relativamente pequeño de media tensión 21,5/11 kV de 5.4 MVA en el que se ha realizado un tratamiento de reacondicionado.

El rendimiento del tratamiento no ha sido muy bueno dado que el contenido en agua pese a haberse reducido a la mitad sigue siendo relativamente alto, de acuerdo a los resultados obtenidos en la valoración de las muestras por medio del método Karl-Fischer, el contenido en humedad ha variado de 24 a 13 ppm, en lo relativo al factor de pérdidas dieléctricas antes y después del tratamiento muestra valores bajos, si bien después ha crecido ligeramente, quizás puede deberse a que se han removido los lodos y las partículas precipitadas sobre los devanados.

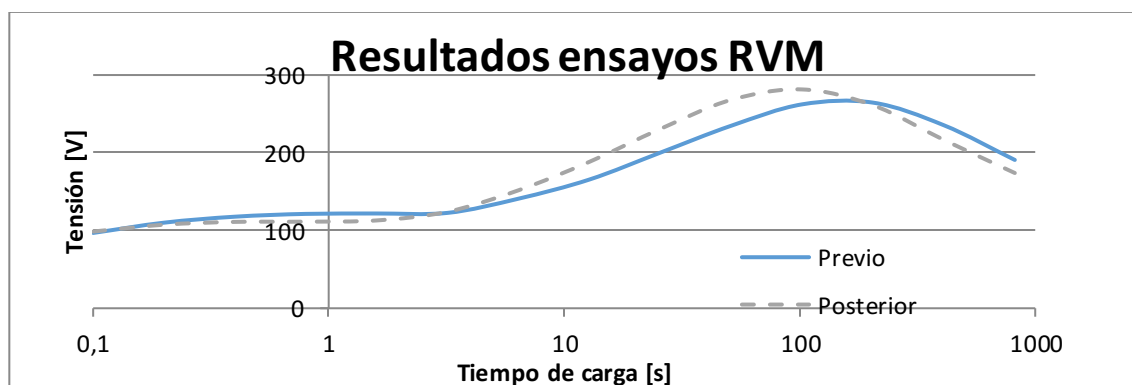


Figura 101 RVM trafo 1 prueba 1

En el ensayo de RVM puede observarse desde un primer momento, que no existen grandes diferencias en el entorno de 1 segundo ha disminuido levemente la tensión leída. La constante de tiempo ha decrecido levemente producto del aumento de las pérdidas dieléctricas, en lo relativo a las tensiones máximas prácticamente no hay diferencias, hecho que puede ser correlacionado con la igualdad que existe en los valores de resistencia de aislamiento medidos previos y posteriores al tratamiento.

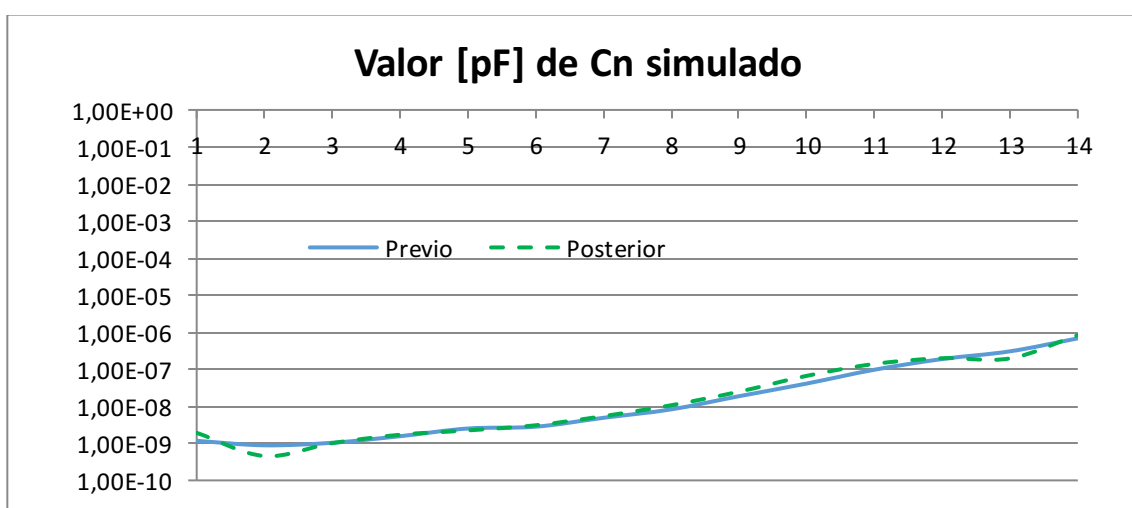


Figura 102 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

Como se puede apreciar en la figura 102 tan solo es destacable una leve disminución de la capacidad en el condensador 2.

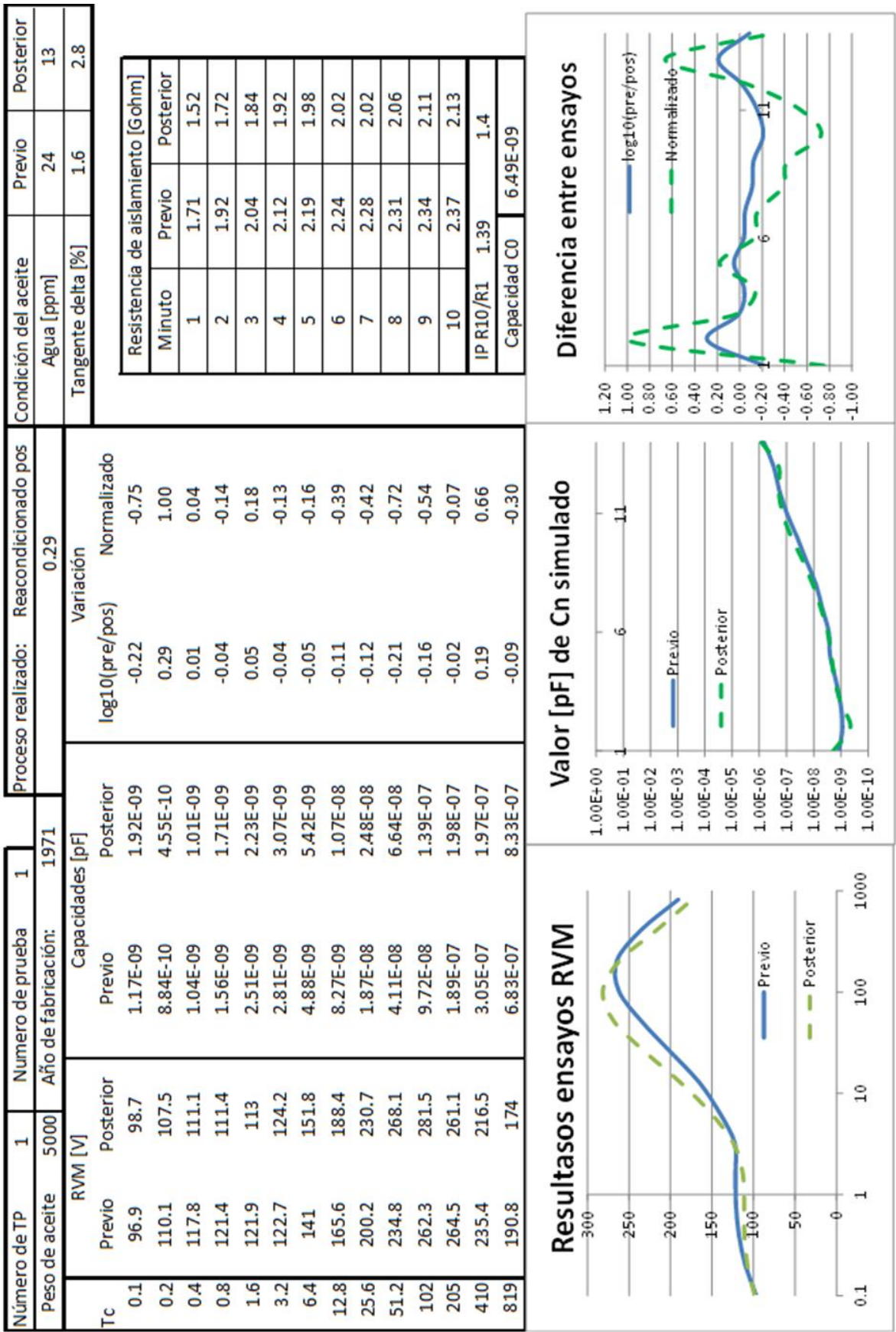


Figura 103 Cuadro resumen, Tp1 ensayo 1.

7.4.2 Transformador 2 ensayo 1

Se trata de un transformador mediano 132/33 kV de 35 MVA el cual ha sido sometido a un tratamiento de reacondicionado.

El rendimiento del tratamiento puede ser calificado como aceptable dado que el contenido en agua ha sido reducido a la mitad y por debajo de los 10 ppm, en lo relativo al factor de pérdidas dieléctricas antes y después del tratamiento en ambos casos se observan valores bajos y similares.

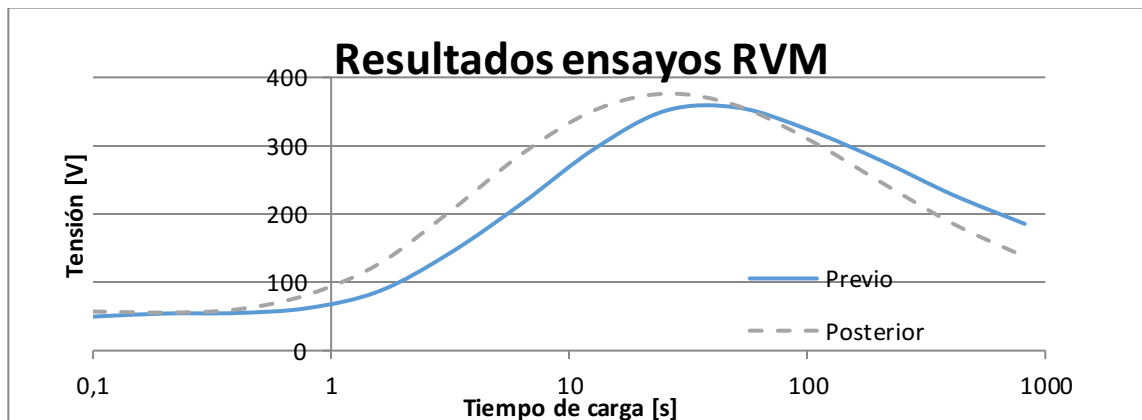


Figura 104 RVM trafo 2 prueba 1

En el ensayo de RVM ya se puede observar que no hay grandes diferencias, ha aumentado levemente el valor máximo de tensión fruto del aumento de la resistencia de aislamiento, este puede ser un ejemplo de un transformador donde el reacondicionado no ha obrado grandes cambios, el valor de constante y la forma de la curva son típicos de un transformador con más de 50 años de antigüedad (fabricado en el año 1961).

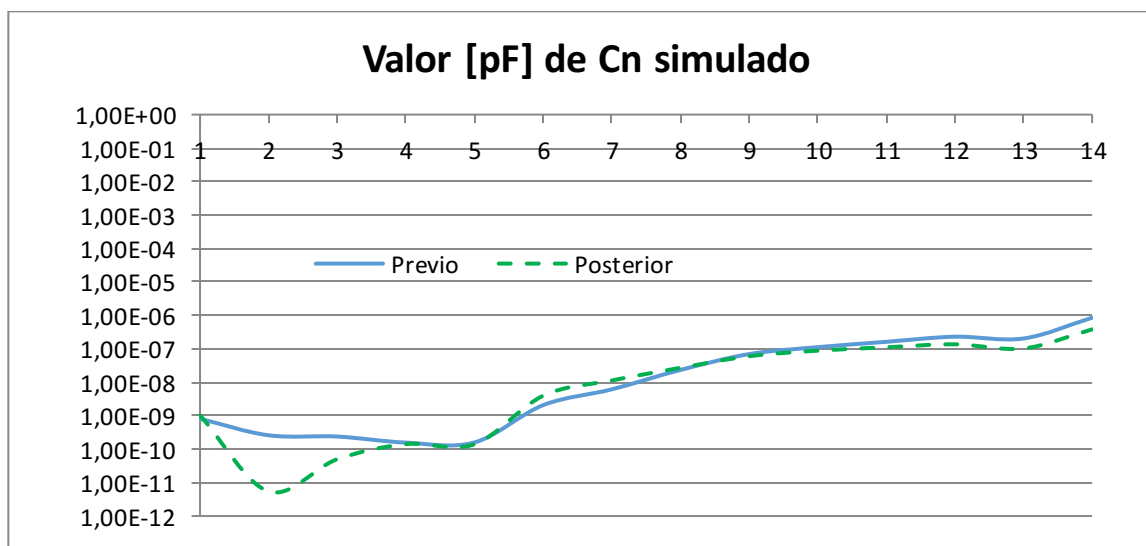


Figura 105 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

Como se puede apreciar en la figura 105 tan solo es destacable la disminución de la capacidad en el condensador 2 en el ensayo posterior, siendo el resto de valores prácticamente coincidentes. Al igual que en el caso del transformador 1 prueba 1 el reacondicionado solo se refleja cambios considerables en el condensador de la rama 2.

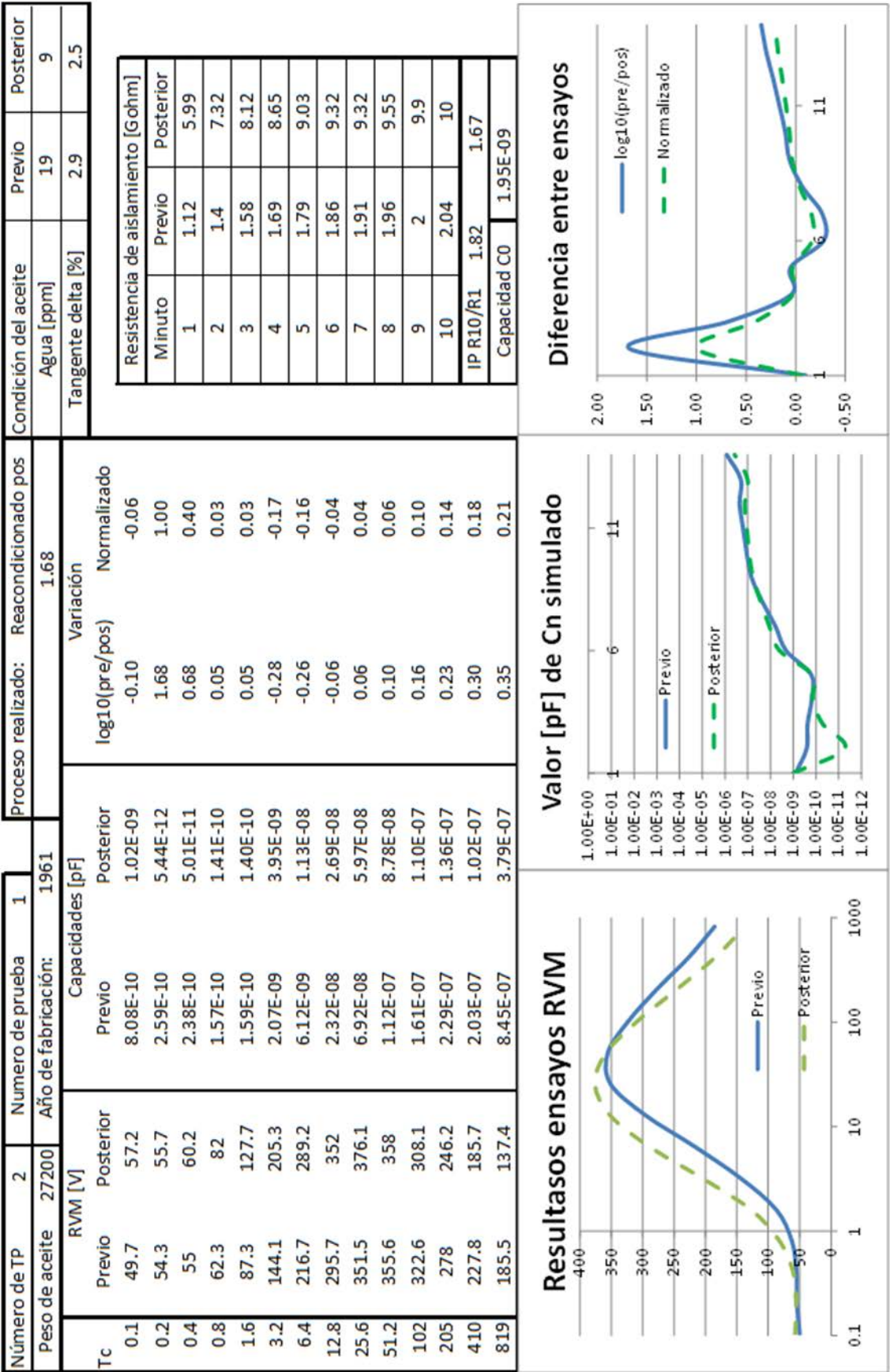


Figura 106 Cuadro resumen, Tp2 ensayo 1

7.4.3 Transformador 3 ensayo 1

Se trata de un transformador de 132/45 kV de 60 MVA, con un volumen importante de aceite dieléctrico (37350 kg) el cual ha sido sometido a un tratamiento de regeneración mediante la cual se han eliminado del aceite compuestos polares y partículas. Posteriormente se ha reacondicionado dado que el valor arrojado del ensayo de contenido de agua en el aceite de 25 ppm es muy elevado e incompatible con un transformador en buena condición.

Pese a la edad del transformador, más de 50 años se ha estimado conveniente realizar un tratamiento dado que como se puede observar en la figura 107 existe un segundo máximo relativo identificado como (2) en el ensayo previo al tratamiento que hace pensar que la condición real del transformador está próxima a la constante de tiempo representada por este máximo relativo, por lo tanto el máximo absoluto y por ende constante de tiempo ha de ser interpretado como una alta concentración de compuestos polares (1), si bien en este caso, si como se describe en el apartado 5.2.3.3 la constante de tiempo de ambos máximos (relativo y absoluto) hubieran resultado más próximas, hubiera sido imposible evaluar este aspecto y tan solo se podría haber hablado de polarización interfacial.

El rendimiento del tratamiento se puede catalogar como bueno, puede observarse que las pérdidas dieléctricas han disminuido de un 31,8% a 1,98% lo cual puede ser calificado como una reducción muy importante, así mismo el contenido en agua ha sido reducido de 25 a 4 ppm, esta reducción es consecuencia del reacondicionado llevado a cabo con posterioridad a la regeneración.

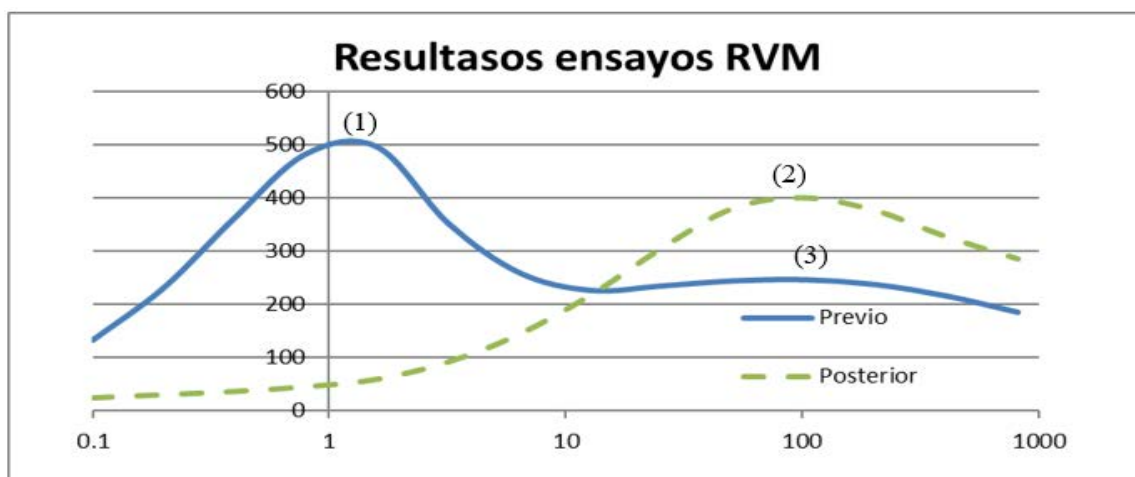


Figura 107 RVM trafo 3 prueba 1

En el ensayo de RVM tradicional puede ser interpretado el ensayo previo al tratamiento como un transformador con un alto contenido en agua y compuestos polares en base a la constante de tiempo de máximo absoluto (1), y la condición del transformador en base a una segunda constante de tiempo proveniente del máximo relativo en torno a los 100 segundos (2), una vez se analiza el ensayo posterior al tratamiento el máximo absoluto (3) coincide en constante de tiempo con el máximo relativo del primer ensayo, la interpretación tradicional indicaría que los compuestos polares existentes en el transformador se han eliminado por medio del tratamiento.

Por otro lado, la influencia de la variación en la resistencia de aislamiento es evidente en base la diferencia de tensión en ambos máximos del entorno de los 100 segundos (2) y (3), el aumento de la resistencia de aislamiento como ha sido descrito en el apartado 5.2.1

provoca un desplazamiento en el eje Y de los resultados sin tener influencia alguna sobre la constante de tiempo.

La evaluación de la capacidad de las 14 ramas del circuito equivalente de Debye muestra que a diferencia de los casos en los que se realiza un reacondicionado, son más las ramas en las que disminuye el valor de C_n , exactamente las 8 primeras ramas tienen un valor de capacidad inferior en el postratamiento que en el pretratamiento, sin embargo, las ramas con las constantes de tiempo más alta, las comprendidas entre la 9 a la 14 se encuentran superpuestas, la lectura de estos resultados es que las primeras 8 ramas son sensibles a la eliminación de compuestos polares y agua del aislamiento del transformador.

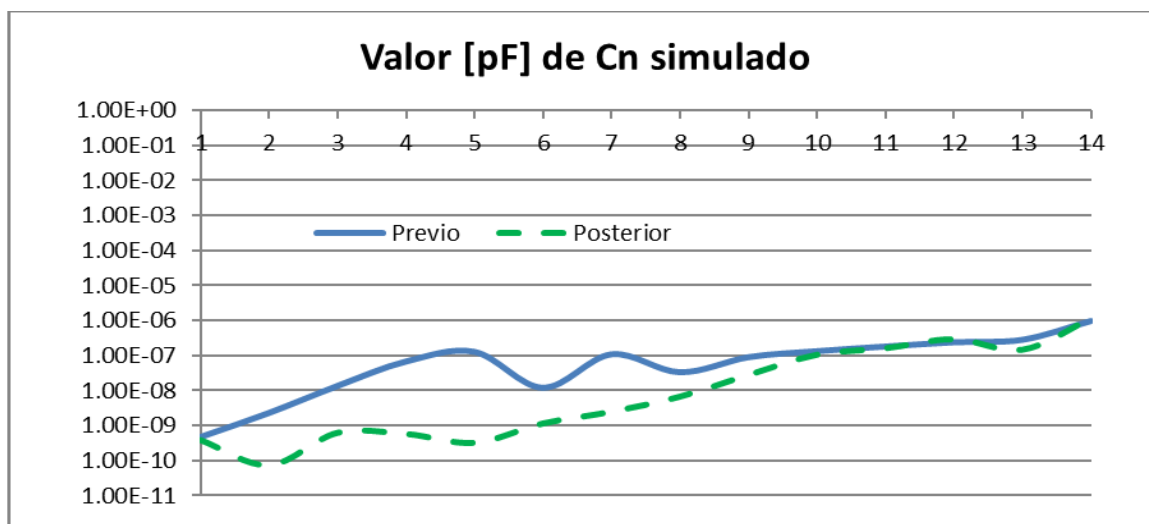


Figura 108 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

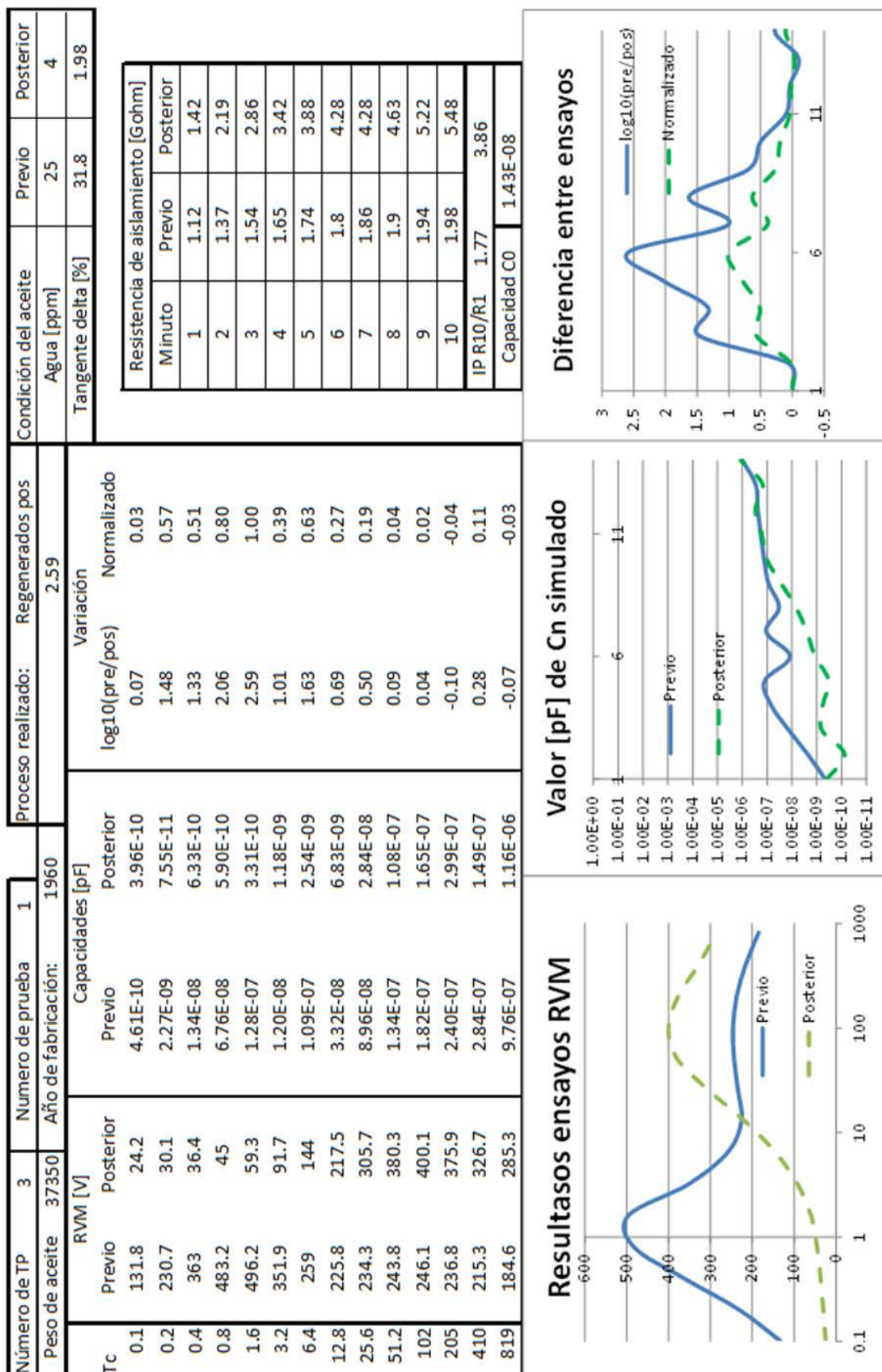


Figura 109 Cuadro resumen, Tp3 ensayo 1

7.4.4 Transformador 3 ensayo 2

Se trata de un transformador en el que en este caso no ha sido realizado ningún tratamiento de aceite, simplemente desde el tratamiento de regeneración analizado en epígrafe anterior 7.4.3 se ha dejado transcurrir el tiempo manteniendo su operación normal. Al tratarse de un transformador con una antigüedad notable, fabricado en 1960, el aceite pasados 5 años desde la regeneración ha vuelto a una condición tal que es sus parámetros indicativos de la condición son susceptibles de requerir al menos un nuevo proceso de reacondicionado, encontrándose el transformador en el límite de requerir una regeneración.

Tabla 24 Condición del aceite inicial y transcurridos 5 años

<i>Condición del aceite</i>	<i>Tras el tratamiento</i>	<i>Transcurridos 5 años</i>
<i>Agua [ppm]</i>	4	25
<i>Tangente delta [%]</i>	1,98	9,8

Se puede apreciar que el contenido de humedad ha alcanzado un valor semejante al que mostraba en la primera intervención (25 ppm) si bien el factor de pérdidas dieléctricas no ha evolucionado de con la misma rapidez. Es necesario prestar atención a como son representados los ensayos en este caso, dado que al tratarse de un proceso de degradación y no procedimiento de mejora de la condición del aceite dieléctrico, la traza denominada “Previo” es la que presenta la mejor condición y la traza denominada “posterior” representa el momento en que la condición no es buena.

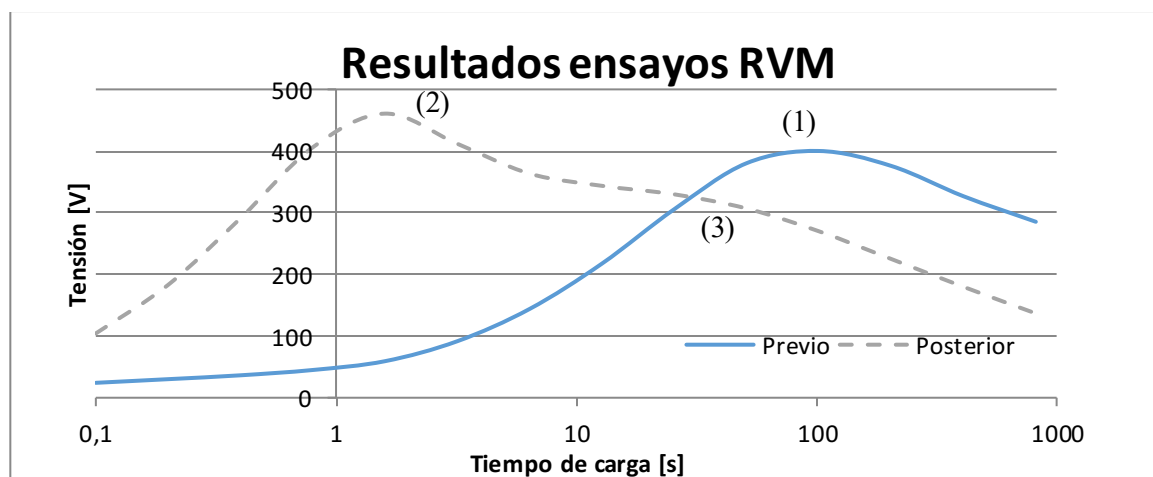


Ilustración 1 RVM trafo 3 prueba 2

De los resultados de los ensayos realizados de tensión de reabsorción mostrados en el gráfico anterior, pueden observarse dos curvas coherentes con los resultados obtenidos en los análisis de aceite realizados, la curva previa muestra un único máximo absoluto (1) en torno a los 100 segundos de constante de tiempo en lo que se puede considerar una curva limpia, mientras que, en la curva posterior, se observa un máximo absoluto a una constante de tiempo muy baja (2) que no ha de ser interpretada como polarización interfacial, típica de tiempos medios, si no como humedad, al tiempo que se intuye, dado que se muestra muy poco pronunciado, un segundo máximo relativo (3) que arroja una idea del estado de la condición del dieléctrico.

Realmente se puede apreciar que estos resultados obtenidos se encuentran muy próximos al límite de sensibilidad de la respuesta del ensayo de tensión de reabsorción, en concreto la curva “Posterior”, al igual que ocurre en aquellos transformadores afectados por polarización interfacial que su efecto puede llegar a ocultar el resto de características de la curva, en este caso el contenido en agua está muy próximo a ocultar todas las demás características de la curva, si bien al tener una constante de tiempo tan baja el efecto de la humedad y dado que se manifiestas en tiempos tan bajos (desplazada hacia la izquierda) no ha terminado de solapar al máximo relativo.

Este fenómeno principal debilidad del ensayo de RVM se explica más detalladamente en los apartados 5.2.3.1 y 5.2.3.3 en los que se detalla el efecto en las distintas ramas en función de su constante de tiempo.

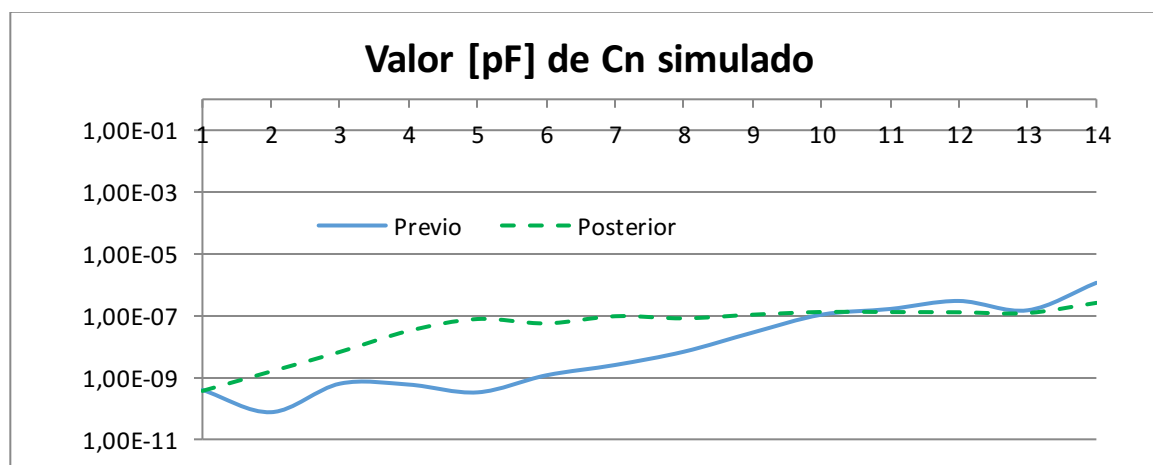


Ilustración 2 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

La evaluación de las capacidades de las 14 ramas del circuito equivalente de Debye muestra que al igual que en los casos en los que se realiza una regeneración y un reacondicionado, son las ramas comprendidas entre la rama número 2 y la rama número 9 las que han mostrado sensibilidad, las ramas entre la 9 y la 14 han disminuido ligeramente lo cual podría deberse a que ha existido un envejecimiento del aislamiento celulósico pero esta afirmación se puede decir que es algo aventurada.

En este caso, debido a que se han simultaneado dos efectos, puede ser dividido el análisis de sensibilidad en dos áreas, una primera área sensible al contenido de humedad la cual se circunscribiría a las ramas dos y tres y una segunda área correspondiente a el aumento del contenido en lodos y compuestos polares que se ve reflejada en las ramas entre la 4 y la 9.

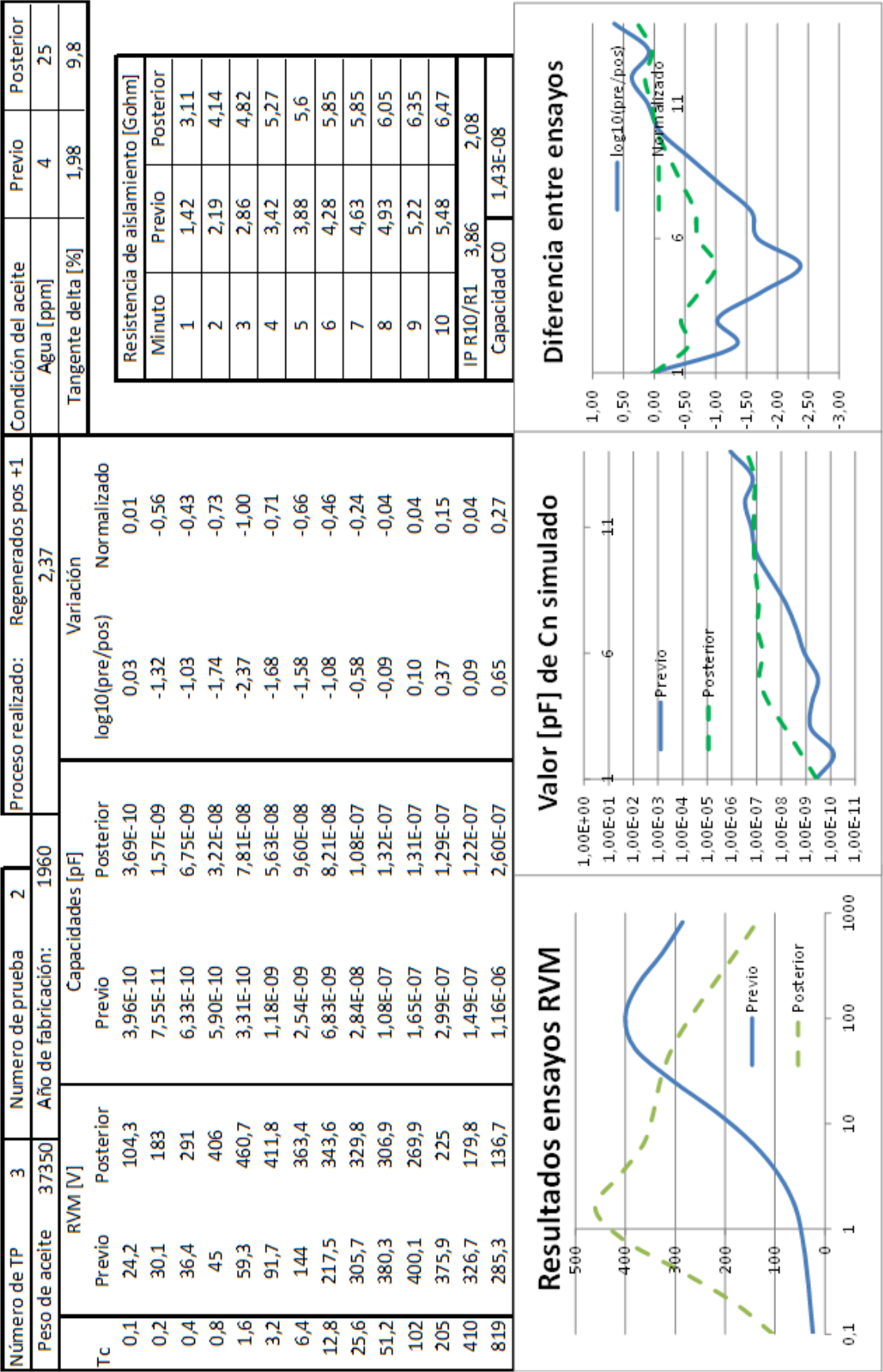


Figura 110 Cuadro resumen, Tp3 ensayo 2

7.4.5 Transformador 4 ensayo 1

En este caso de igual manera que en caso desarrollado en el epígrafe anterior, será analizado un proceso de envejecimiento de un transformador durante su operación normal en el que sus parámetros FQ no han evolucionado de manera reseñable. El periodo entre ensayos ha sido de 5 años.

Tabla 25 Condición del aceite inicial y transcurridos 5 años

Condición del aceite	Ensayo inicial	Transcurridos 5 años
Agua [ppm]	37	27
Tangente delta [%]	8,91	10
Temperatura de la muestra [°C]	35	30

El primer aspecto para resaltar es que el contenido de agua en un transformador muy hidratado sufre grandes oscilaciones en función de la temperatura, existen factores de corrección de este contenido en humedad, si bien han sido presentado los valores medidos sin corregir al tiempo que ha sido indicada la temperatura del aceite de la capa superior de aceite a la que ha sido tomada la muestra.

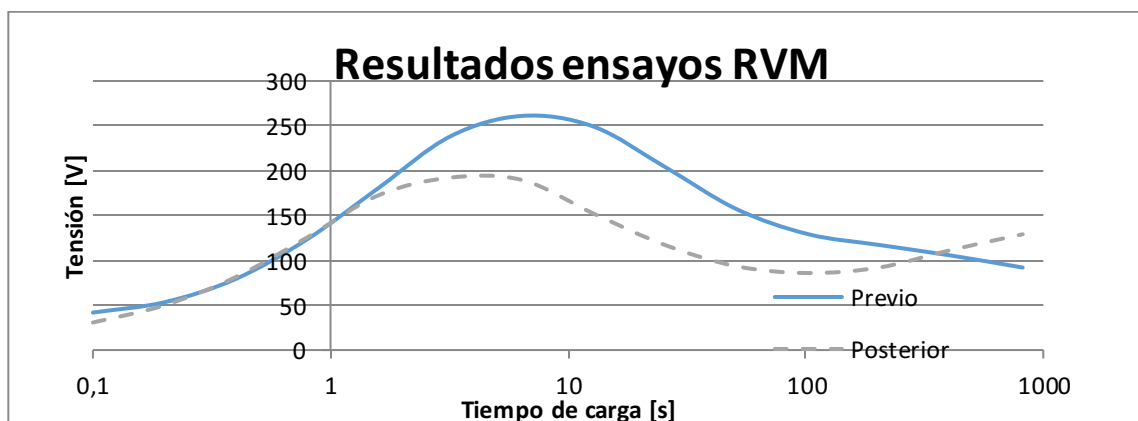


Figura 111 RVM trafo 4 prueba 1

La interpretación del ensayo tradicional de RVM no permite una lectura muy extensa sobre el estado del transformador, dado que presenta un máximo en los tiempos medios que como ya ha indicado con anterioridad, solo permite que sea inferido que el transformador está aquejado de polarización interfacial, es decir existen compuestos polares disueltos en el aceite y en la interfaz papel aceite.

Por otro lado, es posible intuir dada la tensión alcanzada en los primeros ciclos $t < 1$ sg, (midiéndose valores del entono de los 50V) que el contenido en humedad es alto, lo que está en línea con los valores de contenido en humedad extraídos en las muestras de aceite.

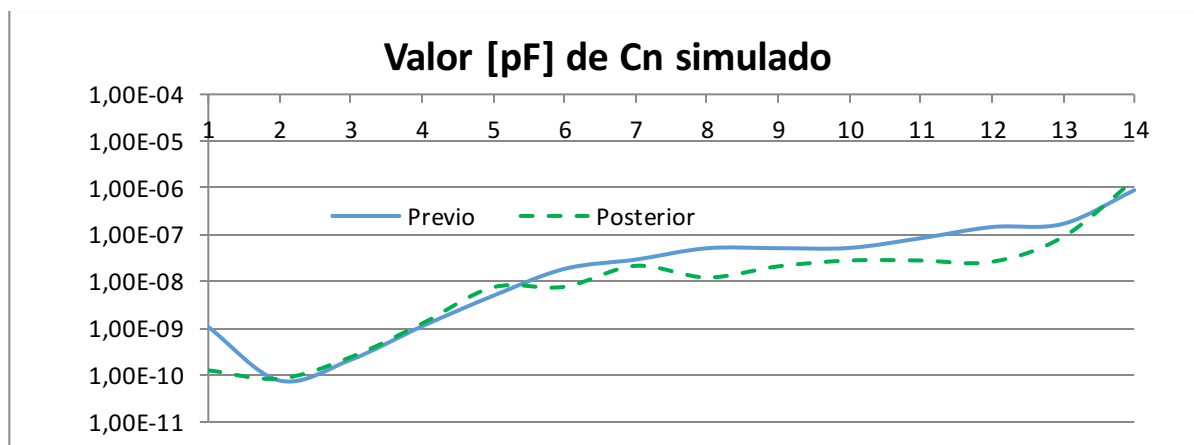


Figura 112 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

La evaluación de la evolución en el valor de la capacidad de cada una de las 14 ramas que componen el circuito equivalente empleado, se observa en este caso es muy distinta a la observada en los casos expuestos anteriormente, una primera conclusión que se puede extraer es que el contenido de humedad pese a los resultados obtenidos en los análisis del aceite no ha variado significativamente a tenor de lo que se observa en las 4 primeras ramas, tan solo en la primera rama hay una diferencia reseñable, dado que la migración de la humedad entre el papel y el aceite es bien conocida y varía en función de la temperatura, se puede explicar esta variabilidad por diferencias de tendencias de temperatura en la toma de muestra, hay que recordar que no es lo mismo, 20°C viniendo de 10°C que 20°C viniendo desde 30°C, aspecto que la corrección del grado de humedad no tiene en cuenta.

Puede observarse que al no existir variaciones reseñables en el factor de pérdidas dieléctricas no hay grandes variaciones en las ramas superiores a la rama número 5, solo puede ser interpretado como envejecimiento la leve reducción de la capacidad (es decir, su capacidad de almacenar energía), lo que puede estar motivado por una disminución del grado de polimerización del papel.

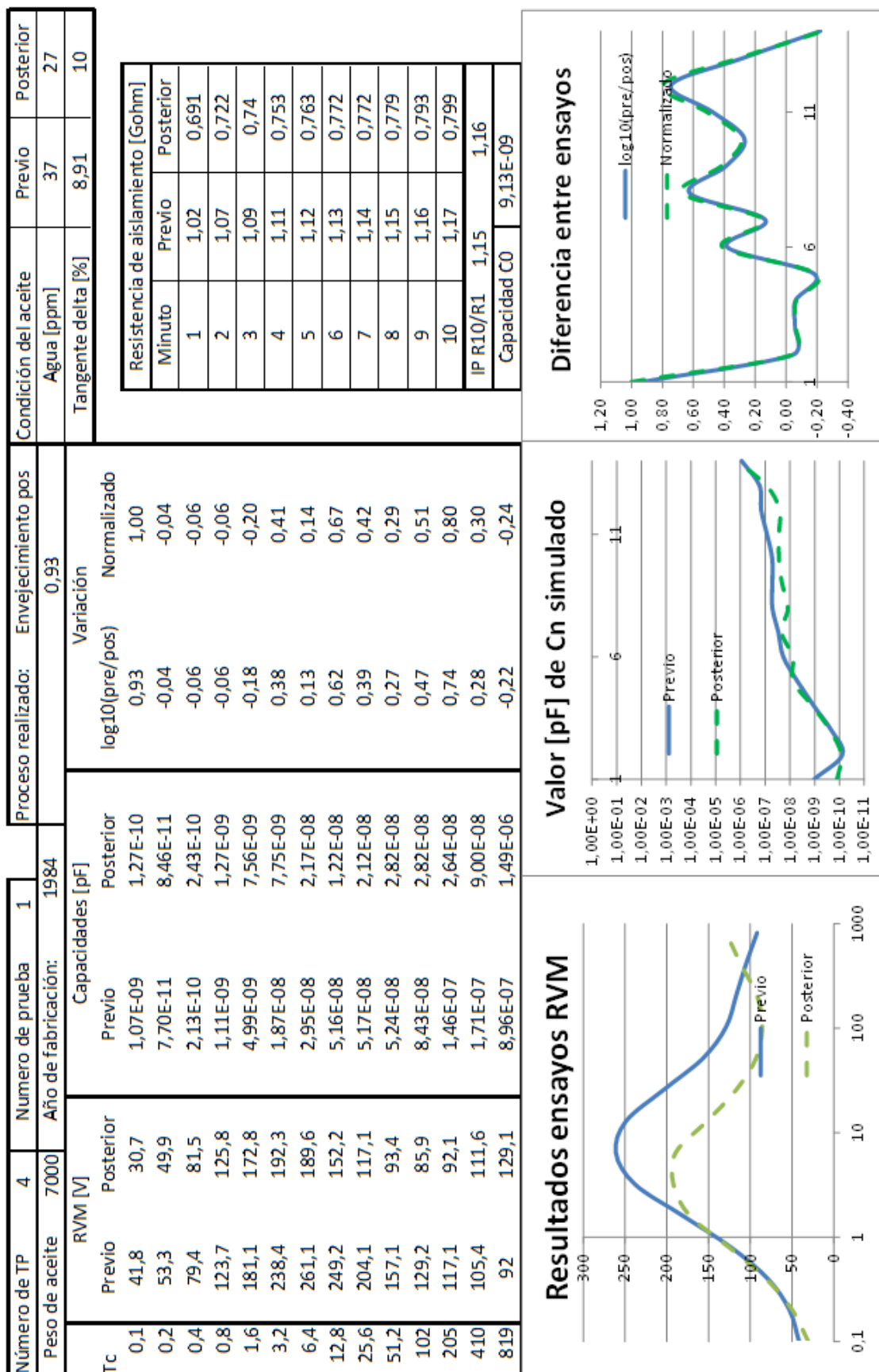


Figura 113 Cuadro resumen, Tp4 ensayo 1

7.4.6 Transformador 4 ensayo 2

Sobre el transformador presentado en el epígrafe anterior 7.4.5 y dado que su valor de pérdidas dieléctricas ha alcanzado el valor límite para estimarse necesario proceder al reacondicionado, y al mismo tiempo que como se ha indicado, la presencia de humedad en el dieléctrico del transformador, tanto sólido como líquido es elevada, después de evaluación de los ensayos previos y de la condición del transformador se ha llegado la conclusión de que es necesario proceder a una regeneración del aceite y un secado de parte activa, a fin de extraer una cantidad mayor de agua de la que se puede extraer con un tratamiento de reacondicionado.

Tabla 26 Condición del aceite inicial y tras un proceso de regeneración y secado de parte activa.

Condición del aceite	Previo	Posterior
Agua [ppm]	27	11
Tangente delta [%]	10	1,3

La evaluación de los resultados empleando las curvas tradicionales del ensayo RVM sin un análisis más profundo que la evaluación por comparación visual es indicativa de que la condición del transformador ha mejorado notablemente. Se puede observar que ha evolucionado de presentar una curva notablemente influenciada por el contenido de humedad del transformador, mostrando un comportamiento similar al descrito en el epígrafe 7.4.4 Transformador 3 ensayo 2, y descrito a su vez teóricamente en los apartados 5.2.3.1 y 5.2.3.3 en el que los efectos de polarización de las ramas con menores constante de tiempo (1), no terminan de solapar los efectos de las ramas con constantes altas (2) a una curva que puede ser considerada como limpia. La característica creciente del final de la curva previa al tratamiento en los tiempos altos (2) es indicativa de que la condición del aislamiento es buena, pese al grado de hidratación que muestra, y que este no presenta un envejecimiento.

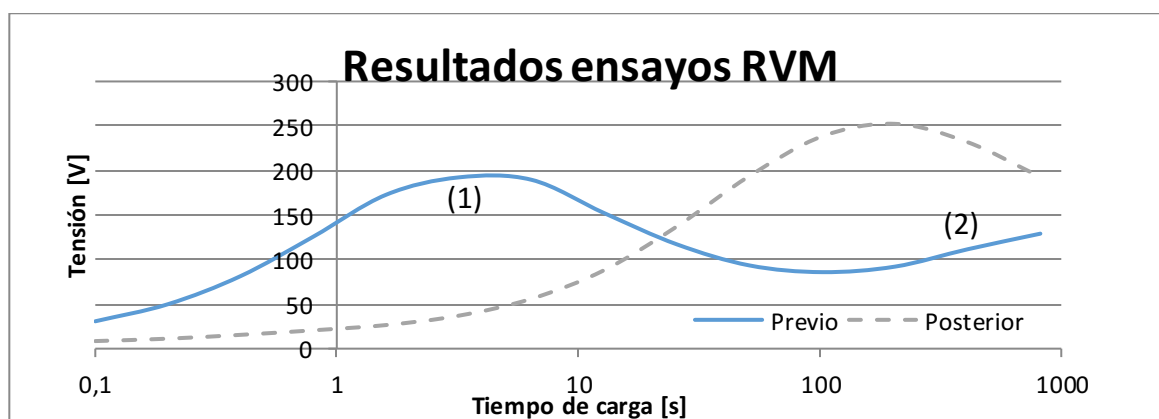


Figura 114 RVM trafo 4 prueba 1

La evaluación de la evolución de la capacidad de las 14 ramas del circuito equivalente empleado para modelar la respuesta muestra que, pese a que se trata de uno de los tratamientos más profundos que se pueden realizar en campo a un transformador, las ramas con las constantes de tiempo más altas, a partir de la rama nº10 apenas han evolucionado en ningún sentido.

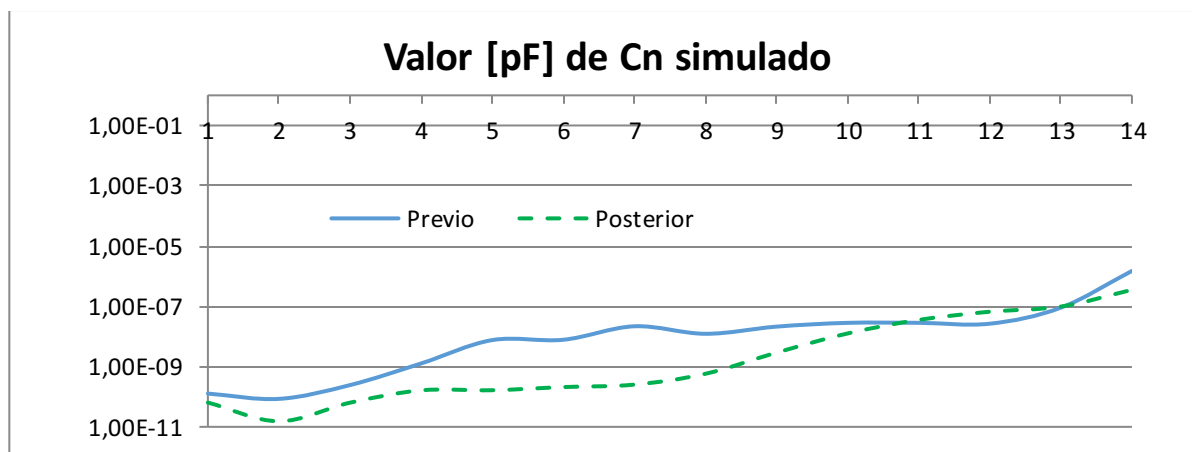


Figura 115 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

Por otro lado, puede ser observado que la evolución del esto de ramas, de la 1 a la 10, sí que es acorde a lo esperado, se observan dos mínimos uno absoluto en la rama 2 el cual como ha sido resaltado en los casos en los que solo se ha reacondicionado el aceite ha de corresponder a la deshidratación del aceite, y un segundo mínimo relativo en la curva posterior en la rama número siete lo cual muestra confluencia con lo observado en todos aquellos tratamientos en los que se han eliminado compuestos polares del aceite y del interfaz papel aceite.

Puede ser observado cómo en los tratamientos en los que se realizan simultáneamente dos tratamientos los resultados se superponen si bien, se puede observar una primera zona cóncava entre las ramas 1 y 4 y una segunda concavidad entre las ramas 5 y 10, que separaría el efecto del secado y de la regeneración respectivamente.

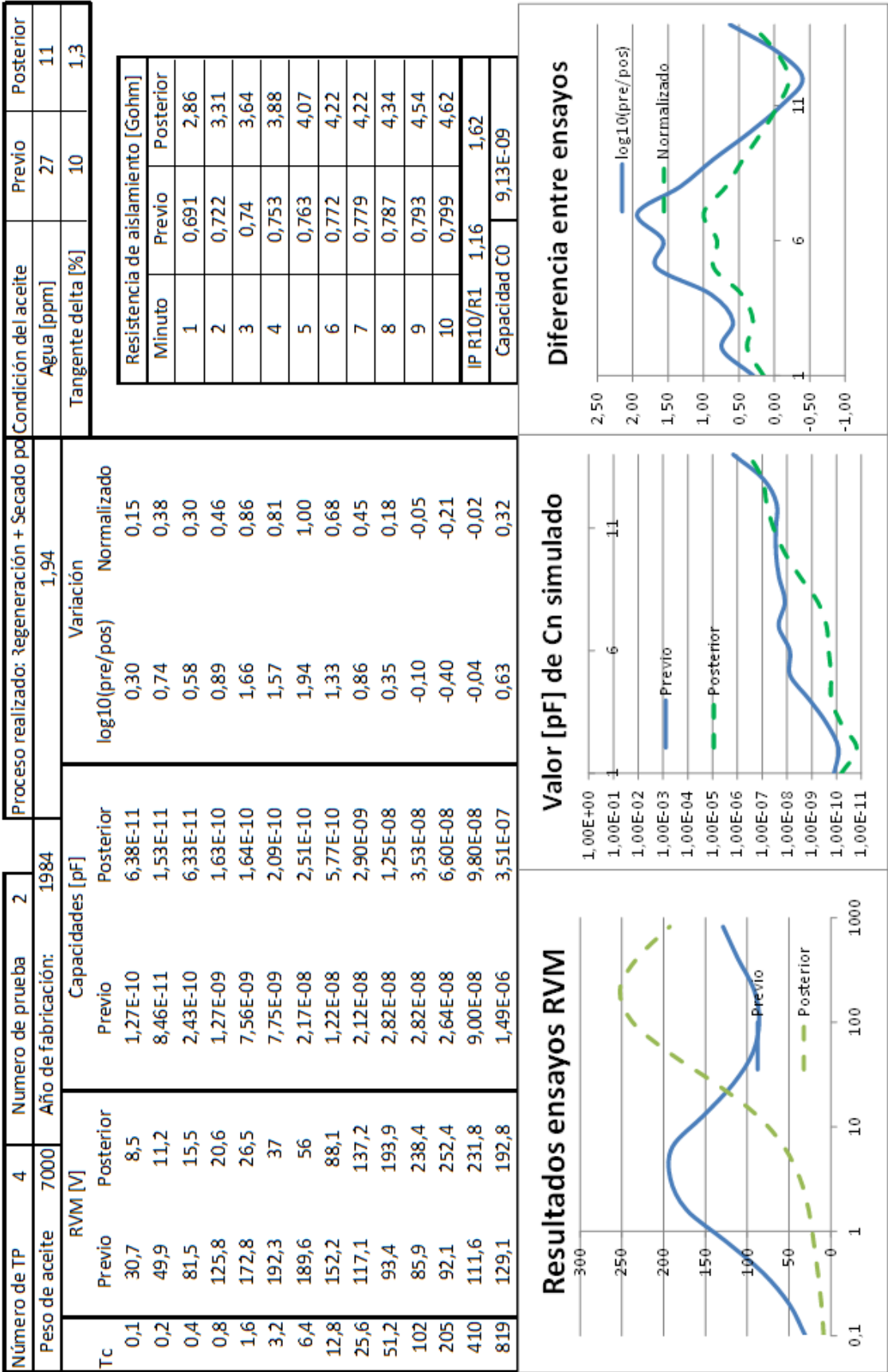


Figura 116 Cuadro resumen, Tp4 ensayo 2

7.4.7 Transformador 5 ensayo 1

En este caso se presenta un transformador en el que se ha realizado una regeneración, si bien los efectos de este procedimiento no han tenido reflejo, ni en los ensayos de tensión de reabsorción y ni en su conversión después del empleo del circuito equivalente.

Tabla 27 Condición del aceite inicial y tras un proceso de regeneración.

Condición del aceite	Previo	Posterior
Agua [ppm]	7	8
Tangente delta [%]	12,3	2,4

Como se puede observar en la tabla 27 en base a los resultados del aceite el tratamiento ha sido exitoso si bien de los resultados obtenidos en el ensayo de tensión de reabsorción, la conclusión que puede ser extraída es que el transformador está aquejado de polarización interfacial antes y después del tratamiento, de lo que se infiere que se han eliminado los compuestos polares del aceite, si bien aquellos lodos adheridos a la superficie de las bobinas y los compuestos polares existentes en el interface papel aceite no han podido ser removidos.

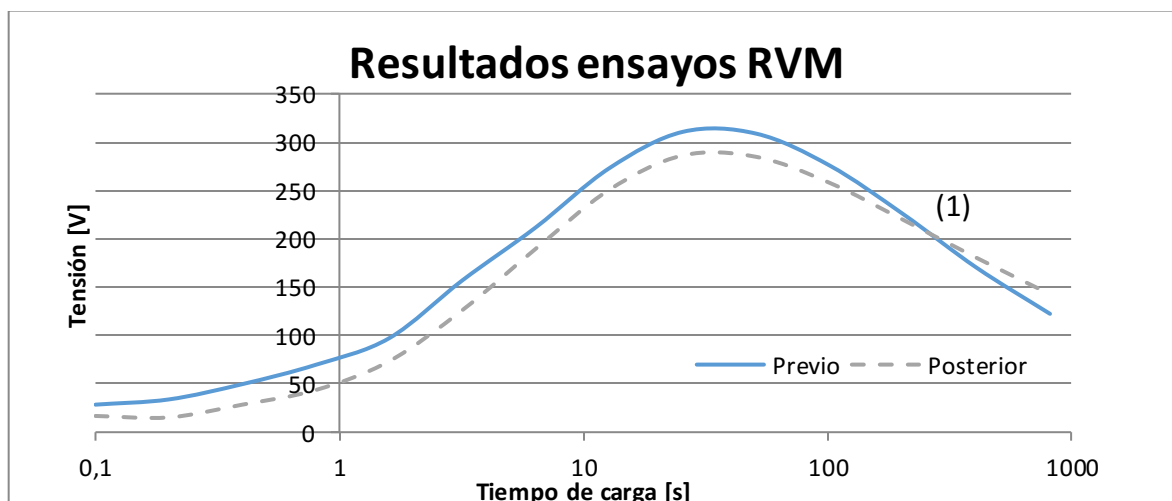


Figura 117 RVM trafo 5 prueba 1

En la figura 117 el valor de tensión alcanzado a lo largo de la curva de reabsorción ha disminuido en todo el recorrido de la misma hasta llegar a los 410 segundos en el que el ensayo posterior sobrepasa en valor al previo (1), lo que se puede ser interpretado como una levísima mejoría en la respuesta en los tiempos más altos, si existiera un desplazamiento completo en vertical de toda la curva podría ser interpretado como un efecto de la variación de la resistencia de aislamiento, si bien el hecho de que crucen las curvas hace que se desestime esta posibilidad. Al mismo tiempo que no ha existido variación en la resistencia de aislamiento que justifique desplazamiento alguno como puede ser observado en la tabla 28.

Tabla 28 Valor obtenido de la resistencia de aislamiento [GOhm] medida minuto a minuto durante los ensayos realizados previos y posteriores al tratamiento

Minuto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Previo	7,35	8,71	9,47	9,97	10,3	10,6	10,8	10,9	11,1	11,2
Posterior	7,12	8,59	9,41	9,98	10,3	10,6	10,6	10,9	11,3	11,4

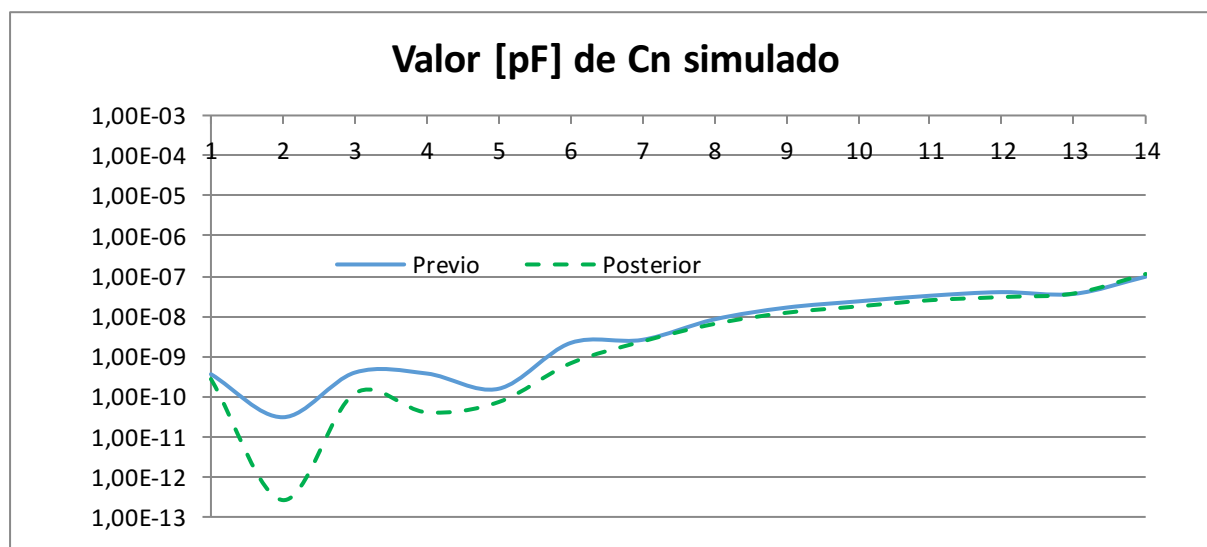


Figura 118 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

La evaluación del valor de las ramas del circuito equivalente, en este caso resulta interesante en base a una serie de premisas, pese a que el ensayo de contenido en humedad del aceite no ha indicado que el transformador se haya deshidratado, como en ocasiones anteriores puede observarse un mínimo absoluto y una concavidad muy pronunciada a la altura de la rama 2 y una segunda concavidad con un mínimo relativo en la rama 4 que se correlaciona con la disminución del factor de pérdidas medido en el aceite. Si bien en esta ocasión la extensión de las ramas cuya capacidad ha disminuido producto de la aplicación de un procedimiento de regenerado es mucho menor, en este caso el efecto sería visible entre las ramas 4 y 7.

En este caso la hipótesis planteada es que el tratamiento no ha arrastrado aquellos compuestos polares adheridos a la superficie de los devanados y tan solo se ha limpiado el aceite de estos compuestos polares, motivo por el cual las ramas más altas de la franja en la que se observan los efectos de la regeneración (entre la 4 y la 10) no se han visto modificadas llegando el efecto únicamente a la rama 6.

Reseñable es también la perfecta superposición de las curvas en las ramas a partir de la número siete, ejemplo claro de la repetitividad del ensayo y de la existencia de zonas sensibles y no sensibles a la presencia de determinados compuestos.

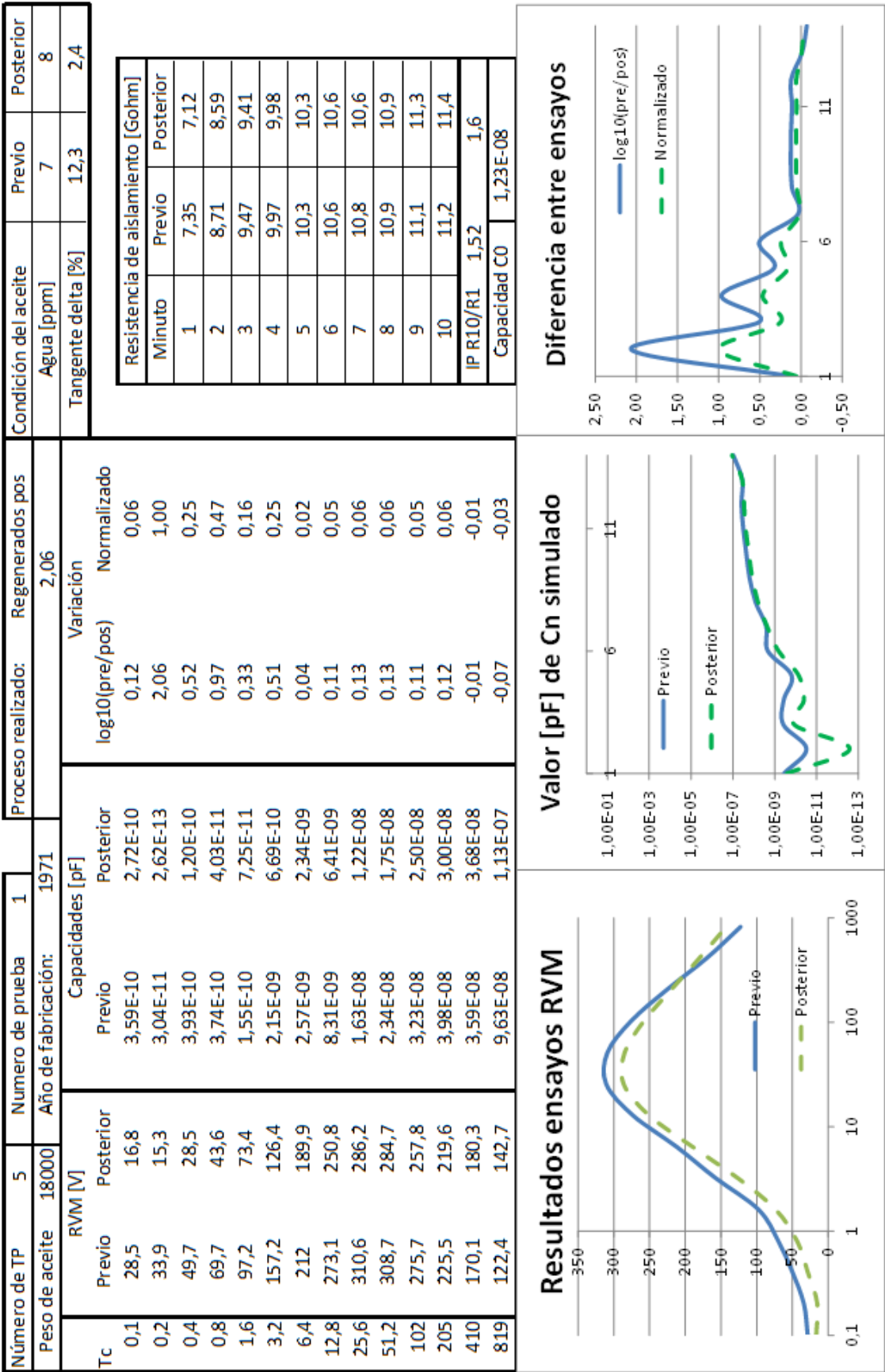


Figura 119 Cuadro resumen, Tp5 ensayo 1

7.4.8 Transformador 6 ensayo 1

En este caso se trata de un transformador que presenta un alto contenido en humedad en base a los ensayos realizados al aceite, sin embargo, el valor de las pérdidas dieléctricas del aceite es correcto por lo que el tratamiento prescrito ha sido un secado de la parte activa.

Tabla 29 Condición del aceite inicial y tras un proceso de secado

Condición del aceite	Previo	Posterior
Agua [ppm]	26	4
Tangente delta [%]	3,3	4,5

De la evaluación de los resultados se puede resaltar que efectivamente, se ha extraído la humedad cuanto menos del aceite, si bien ha de reseñarse que el factor de pérdidas dieléctricas ha aumentado, no porque se haya deteriorado el aceite durante el tratamiento, si no que al haber sido sometido al transformador a varios ciclos de llenado y vaciado esto ha provocado que parte de los lodos y compuestos polares adheridos a los devanados hayan sido arrastrados, y puesto que el aceite no ha sido dirigido a través de ningún filtro ni mecánico ni físico para eliminar estas impurezas ahora son más los compuestos disueltos en el aceite.

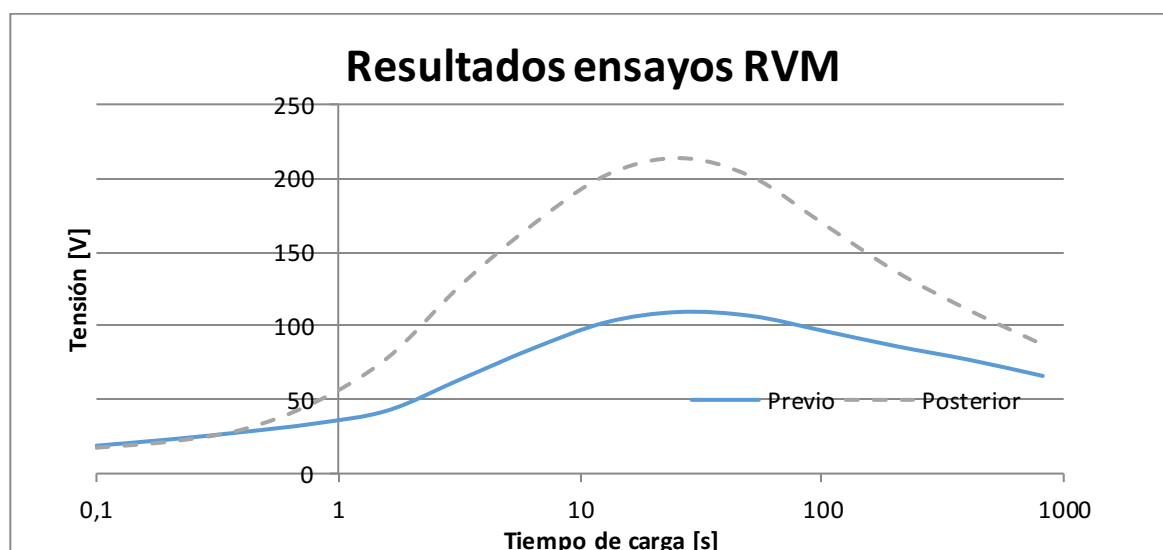


Figura 120 RVM trafo 6 prueba 1

La evaluación del ensayo de RVM no arroja más información que la que indica que el transformador está aquejado de polarización interfacial, y la diferencia de tensión máxima entre los ensayos previos y posteriores justificable en base a que se ha producido un aumento de la resistencia de aislamiento, como se describe en el apartado 5.2.1.

Tabla 30 Valor obtenido de la resistencia de aislamiento [GOhm] medida minuto a minuto durante los ensayos realizados previos y posteriores al tratamiento

Minuto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Previo	0,116	0,116	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Posterior	1,79	1,93	1,99	2,04	2,07	2,09	2,09	2,1	2,12	2,13

La evaluación de los valores de la capacidad de las 14 ramas del circuito equivalente obtenido previo y posterior al tratamiento arroja resultados significativos.

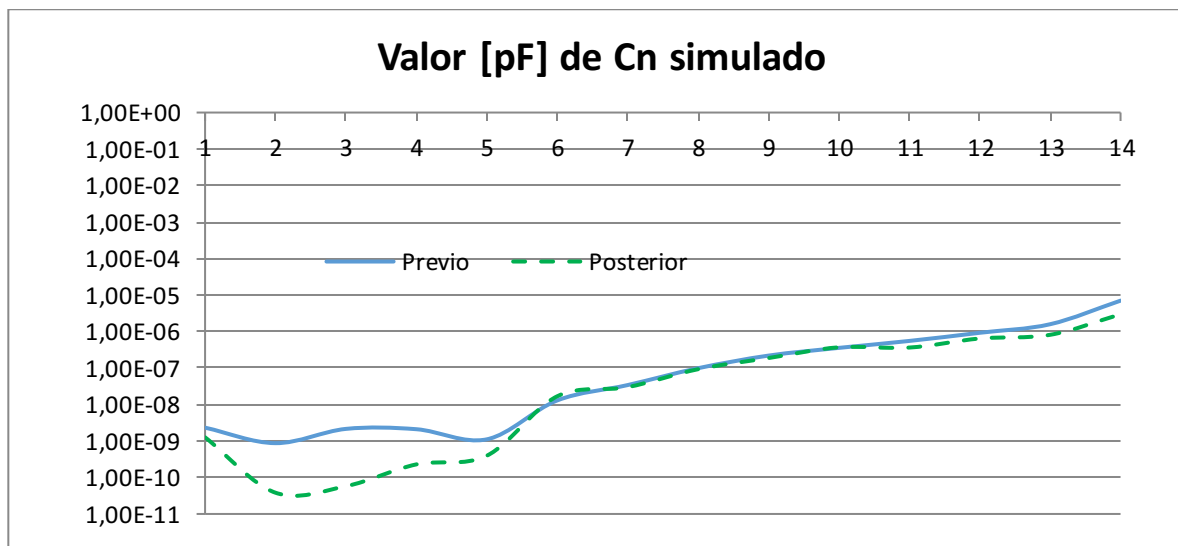


Figura 121 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

Son varios los aspectos reseñables del resultado obtenido, el aspecto más llamativo es que como en otras ocasiones la rama que marca el mínimo absoluto en el ensayo posterior al tratamiento es la numero 2, siendo esta la identificada como en casos anteriores como la más sensible a los tratamientos en los que se elimina la humedad. Reseñable es también la extensión de las ramas que han mostrado sensibilidad al tratamiento, dado que en esta ocasión se han mostrado sensibles las 5 primeras ramas, lo que amplía el número de ramas sensibles con respecto a los transformadores en los que se realiza un reacondicionado, esto puede ser interpretado como fruto de que el secado es un tratamiento mucho más eficaz para extraer humedad que el reacondicionado.

Reseñable es también el tramo comprendido entre la rama 5 y la 10, ramas sensibles a los tratamientos de regeneración, como se puede apreciar, se superponen perfectamente, lo cual es coherente si no se han eliminado compuestos polares salvo el agua, ni lodos del transformador. Es también reseñable el perfil de este tramo, siendo convexo o cóncavo hacia abajo como se prefiera denominar, este aspecto nos hace pensar que un tratamiento de regeneración podría haber sido útil dado que hay presencia de estos compuestos, en base a la forma de la curva que observamos a diferencia de los transformadores tratados en los que este tramo muestra una forma cóncava hacia arriba.

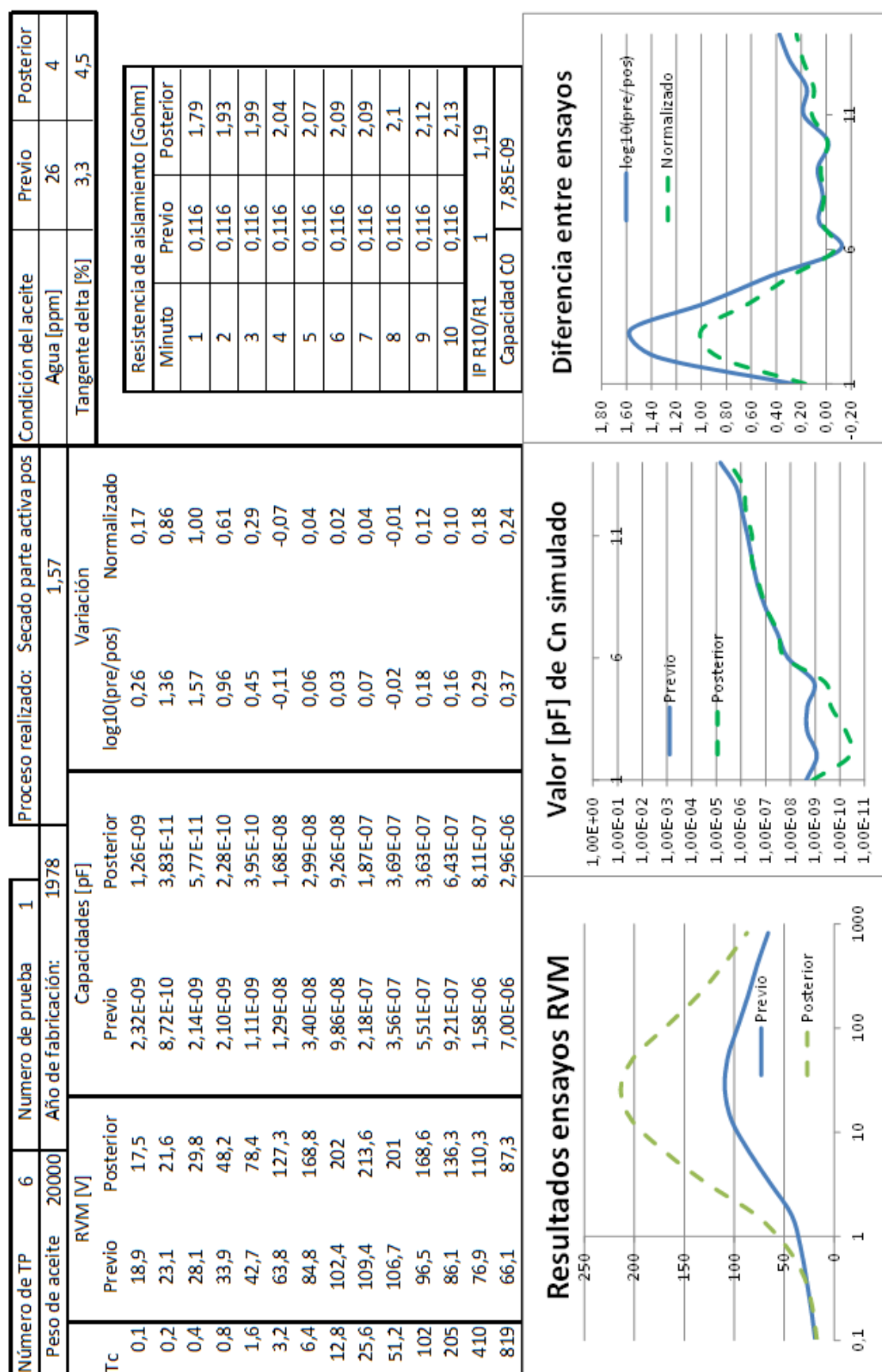


Figura 122 Cuadro resumen, Tp6 ensayo 1

7.4.9 Transformador 6 ensayo 2

Este caso está estrechamente relacionado con el presentado en el epígrafe anterior, dado que se han empleado los ensayos realizados antes y después del mismo tratamiento, sin embargo, se ha cambiado la configuración de la medida, en este caso el ensayo de tensión de reabsorción ha sido realizado inyectando tensión por el devanado de menor tensión, cortocircuitando y referenciando a tierra el devanado de alta tensión.

Los resultados son prácticamente similares por lo que en este caso puede ser inferido que el tratamiento ha extraído la humedad también del devanado de baja tensión, lo cual se considera más complicado al estar este envuelto por los devanados de alta tensión y de regulación, lo que le hace más inaccesible.

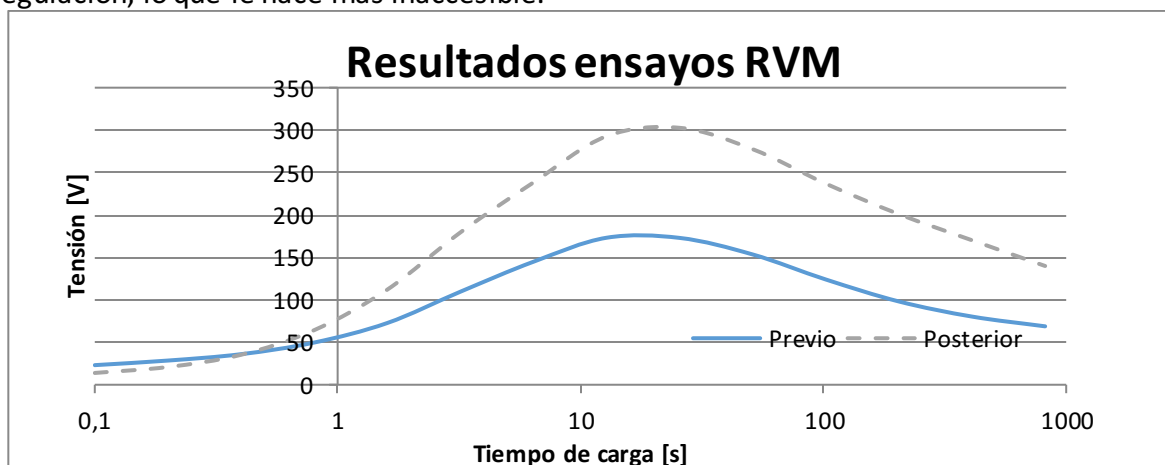


Figura 123 RVM trafo 6 prueba 2

Las curvas obtenidas en el ensayo de tensión de reabsorción son prácticamente similares a las mostradas en el caso anterior, se puede observar que la distancia entre los puntos respectivos en vertical en este caso es inferior, de igual manera que la variación de la resistencia previa y posterior al tratamiento también es inferior.

Así mismo la evaluación de la variación del valor de la capacidad de las 14 ramas del circuito equivalente es exactamente la misma a la indicada en el apartado anterior: *“Son varios los aspectos reseñables del resultado obtenido, el aspecto más llamativo es que como en otras ocasiones la rama que marca el mínimo absoluto en el ensayo posterior al tratamiento es la numero 2, siendo la identificada como en casos anteriores como la más sensible a los tratamientos en los que se elimina la humedad. Reseñable es también la extensión de las ramas que han mostrado sensibilidad al tratamiento, dado que en esta ocasión se han mostrado sensibles las 5 primeras ramas, lo que amplía el número de ramas sensibles con respecto a los transformadores en los que se realiza un reacondicionado, lo que se puede interpretar como fruto de que el secado es un tratamiento mucho más eficaz para extraer humedad que el reacondicionado.”*

Reseñable es también el tramo comprendido entre la rama 5 y la 10, ramas sensibles a los tratamientos de regeneración, como se puede apreciar, se superponen perfectamente, lo cual es coherente si no se han eliminado compuestos polares salvo el agua, ni lodos del transformador. Es también reseñable el perfil de este tramo, siendo convexo o cóncavo hacia abajo como se prefiera denominar, este aspecto nos hace pensar que un tratamiento de regeneración podría haber sido útil dado que hay presencia de estos compuestos, en base a la forma de la curva que observamos a diferencia de los transformadores tratados en los que este tramo muestra una forma cóncava hacia arriba”.

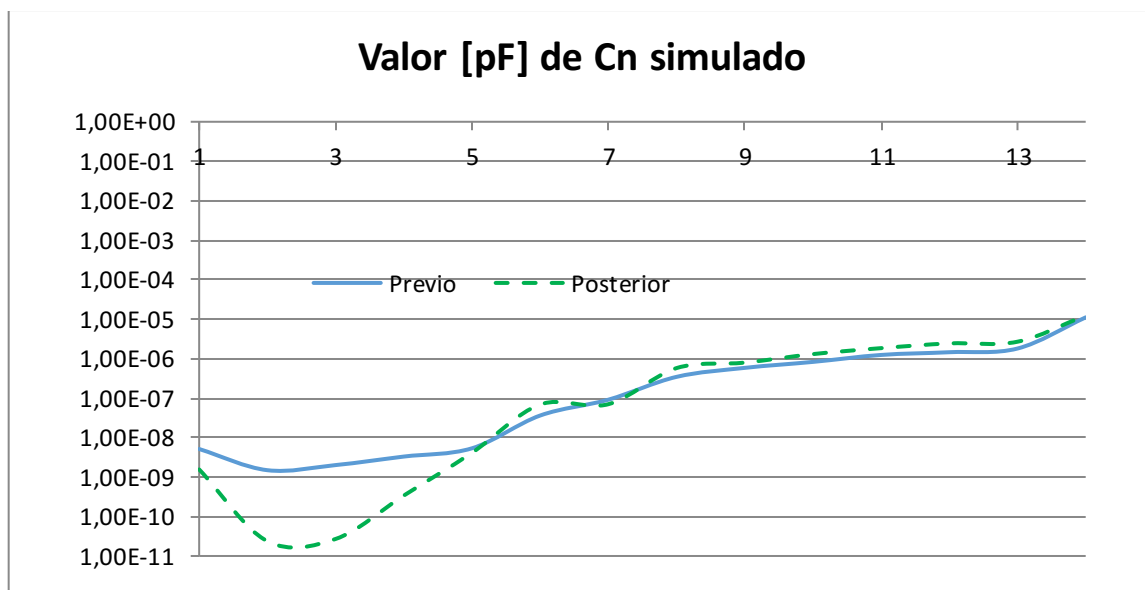


Figura 124 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

Es reseñable la convergencia de los resultados, pese a que los circuitos equivalentes han sido calculados con datos de partida distintos, la resistencia de aislamiento no ha mejorado tanto en el ensayo de baja tensión masa como en el de alta tensión masa, la capacidad geométrica de las dos configuraciones es igualmente diferente siendo la capacidad CH+CHL $7,85\text{e-}9$ F mientras que la capacidad CL+CLH es $1,47\text{e-}8$ F, así como la diferencia entre las distintas curvas. Esto está plenamente alineado con lo que ha sido indicado y demostrado en los apartados 5.2.1 y 5.2.2, en los que se indicaba que la capacidad geométrica y la resistencia de aislamiento del circuito equivalente tienen influencia sobre el valor de tensión alcanzado, pero no determinarán ni tendrán efectos sobre los tiempos de los distintos mecanismos de polarización presentes en el dieléctrico.

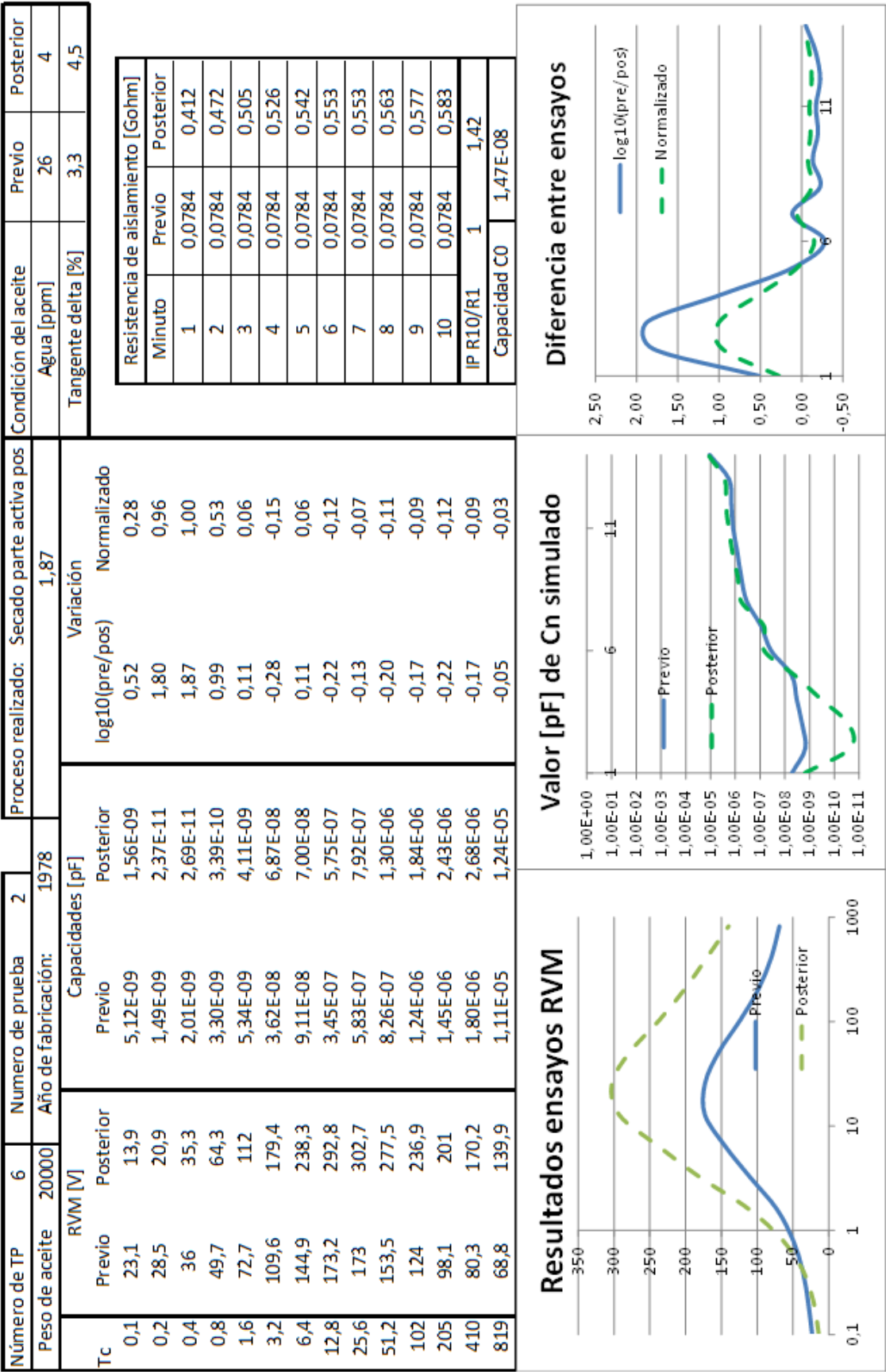


Figura 125 Cuadro resumen, Tp6 ensayo 2

7.4.10 Transformador 7 ensayo 1

El caso que se presenta en este transformador tiene la particularidad de que se trata de un transformador sobre el que inicialmente se realiza un reacondicionado y a la vista de que los resultados no fueron los deseados es aplicado a continuación un procedimiento de secado de parte activa. Los ensayos que van a ser presentados son como previo al tratamiento el ensayo realizado una vez reacondicionado el transformador y como posterior al tratamiento el ensayo realizado tras llevar a cabo un procedimiento de secado de parte activa.

Tabla 31 Condición del aceite tras reacondicionado y tras un proceso de secado

<i>Condición del aceite</i>	<i>Previo</i>	<i>Posterior</i>
<i>Agua [ppm]</i>	22	10
<i>Tangente delta [%]</i>	3,7	3,4

El transformados a las pocas horas de finalizar el reacondicionado, durante los ensayos presentó valores de contenido en humedad muy elevados (22 ppm) determinándose que se trata de humedad procedente del papel por lo que no se considera que deshidratar el aceite sea el procedimiento adecuado, a la vista de los resultados se determina que es necesario realizar un secado de parte activa.

De los resultados del ensayo RVM representado de acuerdo con la representación estándar no permiten extraer conclusiones concluyentes, ya que no es posible apreciar variación significativa alguna en parte debido a que se trata de una respuesta fuertemente influenciada por la presencia de polarización interfacial.

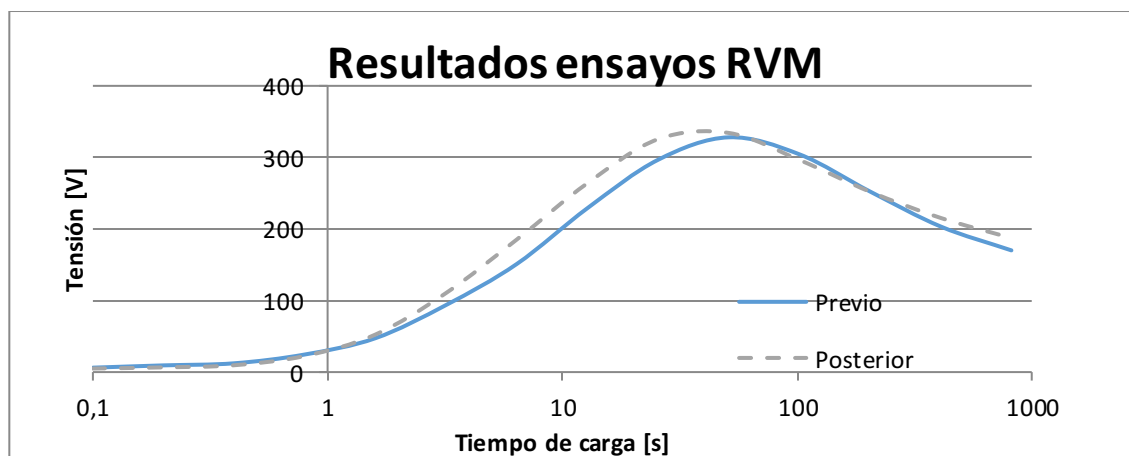


Figura 126 RVM trafo 7 prueba 1

La evaluación de la respuesta de los circuitos equivalentes de Debye obtenidos, observando el valor de la capacidad de cada una de sus catorce ramas, permite apreciar variaciones sustanciales entre ambos ensayos.

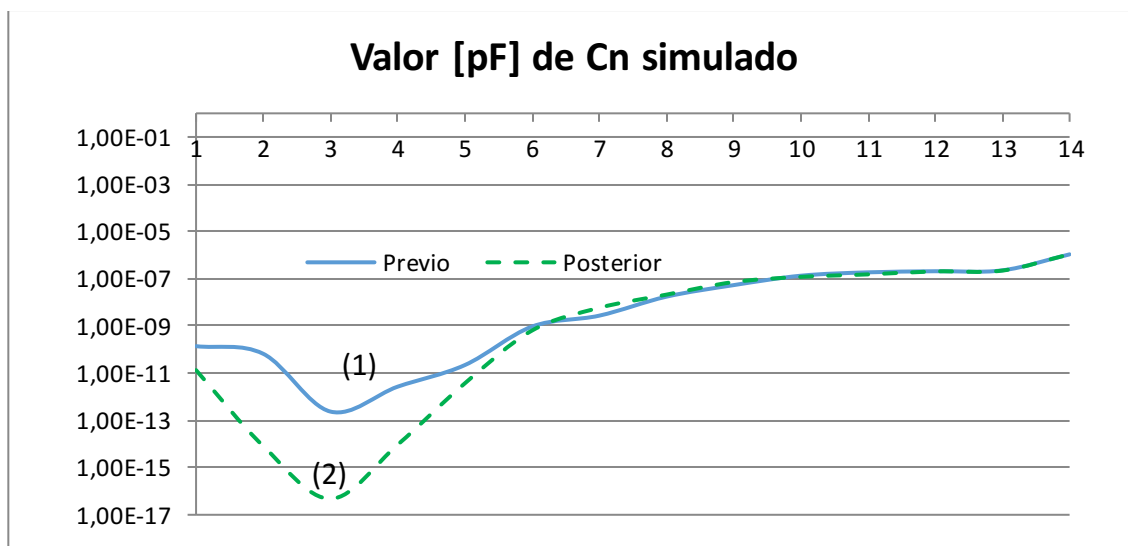


Figura 127 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

En primer lugar, ha de ser reseñada la forma de la curva del ensayo previo, es necesario recordar el que en este caso el transformador previamente fue sometido a un proceso de reacondicionado, de ahí que se observe que para la rama nº3 una forma con una concavidad pronunciada (1). En la comparativa entre la curva previo y posterior puede ser observado que, dado que como en ambos casos el tratamiento ha estado enfocado tan solo a la eliminación del agua, reacondicionado inicial y secado de parte activa posterior, en ambos casos la rama que ha mostrado más sensibilidad ha sido la rama número 3 (1) y (2). Si se observa el número de ramas sensibles a los distintos procesos se puede apreciar que pese a que en ambos casos la rama de mayor sensibilidad sea la 3 el número de ramas sensible al secado de devanados comprende a las 5 primeras ramas.

Reseñable es también el comportamiento en las ramas entre la 6 y la 10, en las que al no haberse regenerado el aceite no es posible apreciar variación alguna, incluso se puede correlacionar la forma de la respuesta del ensayo RVM convencional, en el que todo efecto se encuentra solapado por la presencia de polarización interfacial, con la forma convexa o cóncava hacia abajo de la curva.

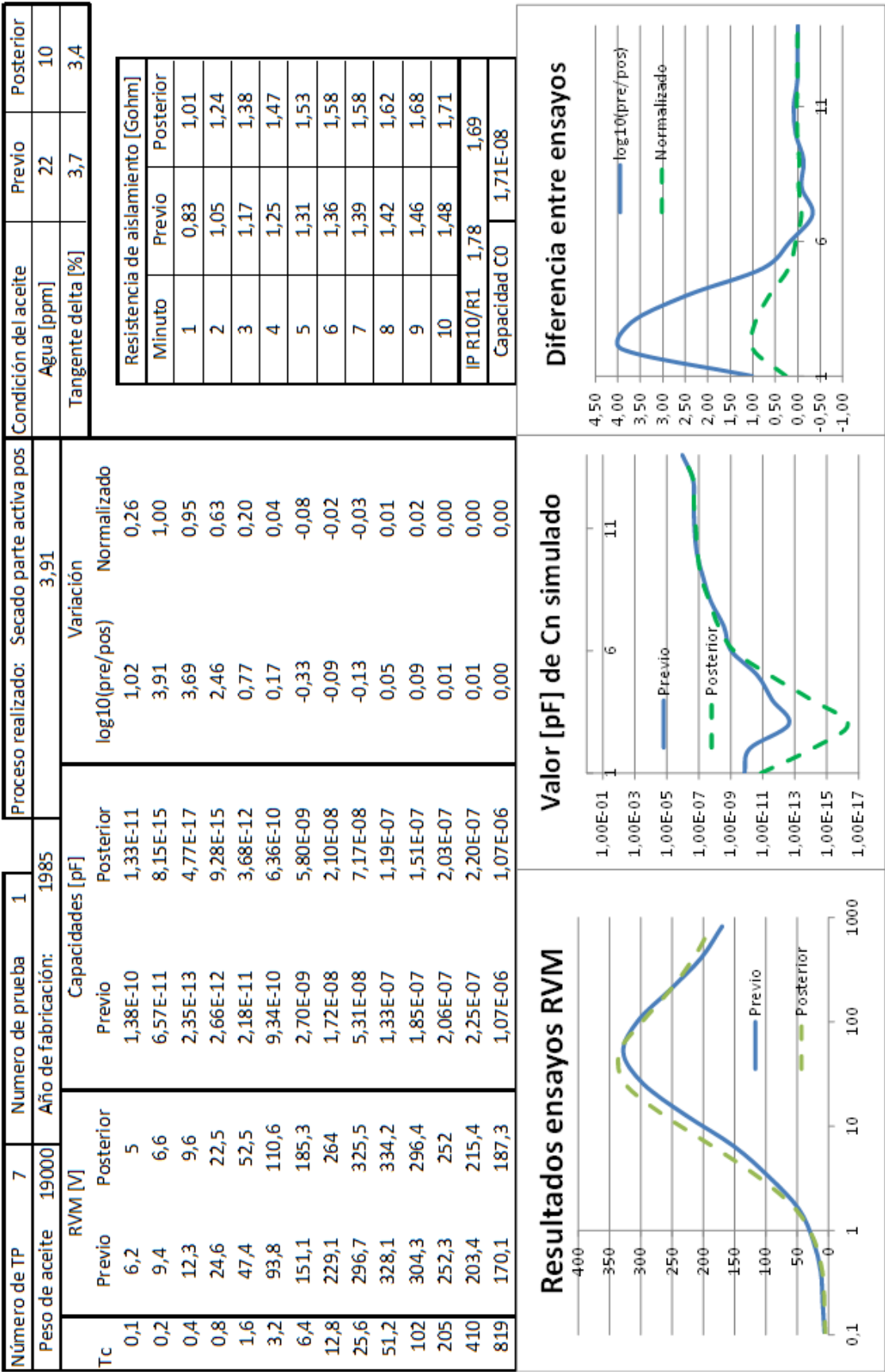


Figura 128 Cuadro resumen, Tp7 ensayo 1

7.4.11 Transformador 8 ensayo 1

Sobre el transformador nº8 se ha realizado la evaluación tras un proceso de secado de parte activa y transcurrido un año desde la aplicación de ese procedimiento tanto para ensayos realizados en el lado de alta tensión, es decir inyectando tensión en el devanado de alta tensión con la baja tensión referenciada a tierra, como en el lado de baja tensión en el que se permuta el cableado en ambos lados del transformador.

En este primer apartado se presenta la evaluación de los resultados para el tratamiento de secado evaluado desde el lado de AT.

Tabla 32 Condición del aceite previo y posterior a un proceso de secado

<i>Condición del aceite</i>	<i>Previo</i>	<i>Posterior</i>
<i>Agua [ppm]</i>	31	2
<i>Tangente delta [%]</i>	4,5	7,1

El análisis de la condición del aceite indica que efectivamente se ha deshidratado mucho el aceite, pero se puede ser apreciado que se ha producido un efecto indeseado, dado que el factor de pérdidas dieléctricas del aceite ha aumentado, posiblemente producto de que se han removido los lodos que se encontraban posados en las superficies planas del transformador, enturbiando el aceite y mermando su capacidad dieléctrica. Otra prueba de esta circunstancia es la variación de la resistencia de aislamiento media, que al contrario de lo que es habitual después de un proceso de mejora de la condición del dieléctrico, ha disminuido en lugar de mejorar.

Tabla 33 Resistencia de aislamiento en GOhm, antes y después del tratamiento

<i>Minuto</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
<i>Previo</i>	0,89	0,91	0,92	0,92	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94
<i>Posterior</i>	0,56	0,63	0,68	0,7	0,72	0,74	0,74	0,75	0,77	0,78

En el ensayo de RVM presentado mediante la representación tradicional, puede observarse una evolución atípica, se observa que en los tiempos de polarización bajos ($t < 1\text{sg}$) el valor de la tensión alcanzada ha disminuido notablemente, lo que es interpretable como una disminución del contenido de humedad (1), si bien, pese a la disminución del valor de resistencia los valores alcanzados en los tiempos medios y altos son sustancialmente mayores (2), este incremento del valor de tensión alcanzado permite realizar dos lecturas, por un lado la mejoría por la deshidratación del papel y el aceite, y por otro lado es achacable al aumento del factor de pérdidas dieléctricas y a una mayor contribución de la polarización interfacial.

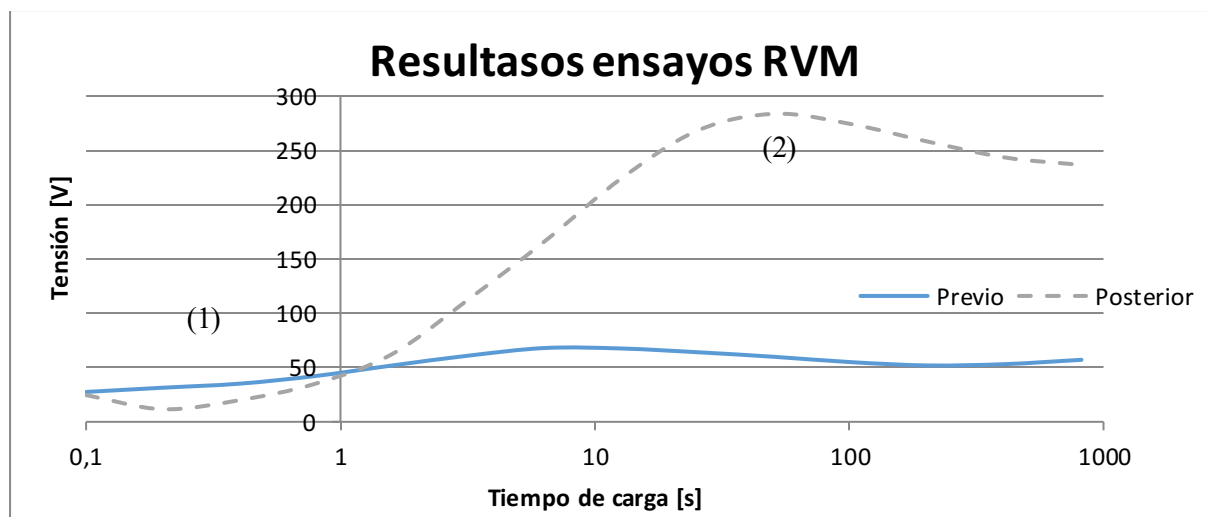


Figura 129 RVM trafo 8 prueba 1

La evaluación de las capacidades de las distintas ramas del circuito equivalente de Debye nos permiten hacer una interpretación semejante, si bien más nítida en cuanto a la separación de las áreas de influencia de las distintas sustancias.

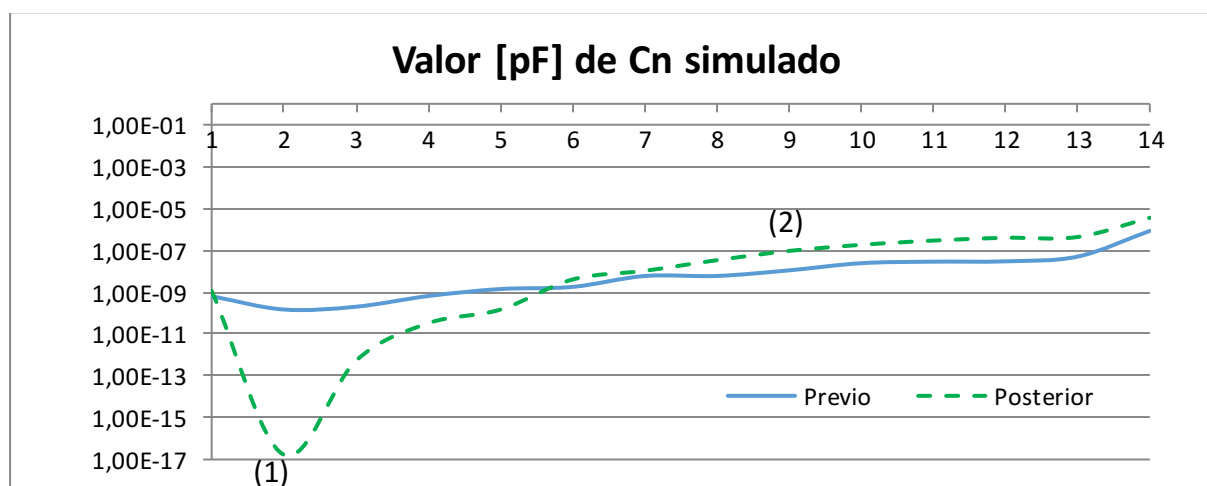


Figura 130 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

La superposición de las respuestas previa y posterior al tratamiento permite observar dos áreas, las ramas de la 1 a la 6 (1) que como se ha observado en los casos anteriores han sido sensibles al tratamiento de secado de parte activa, si bien es necesario reseñar que al tratarse de un tratamiento de secado de parte activa la extensión de las ramas afectadas es más amplia que cuando se trata de un reacondicionado, y un segundo efecto, indeseado en este caso (2) en las ramas a partir de la 6 en las que el valor de capacidad aumenta, efecto contrario al observado cuando se hace una regeneración, este efecto está en línea con el aumento del factor de pérdidas dieléctrico observado en los análisis fisicoquímicos del aceite presentados en la tabla 32 y al mal comportamiento del valor de resistencia óhmica de devanados presentado en la tabla 33.

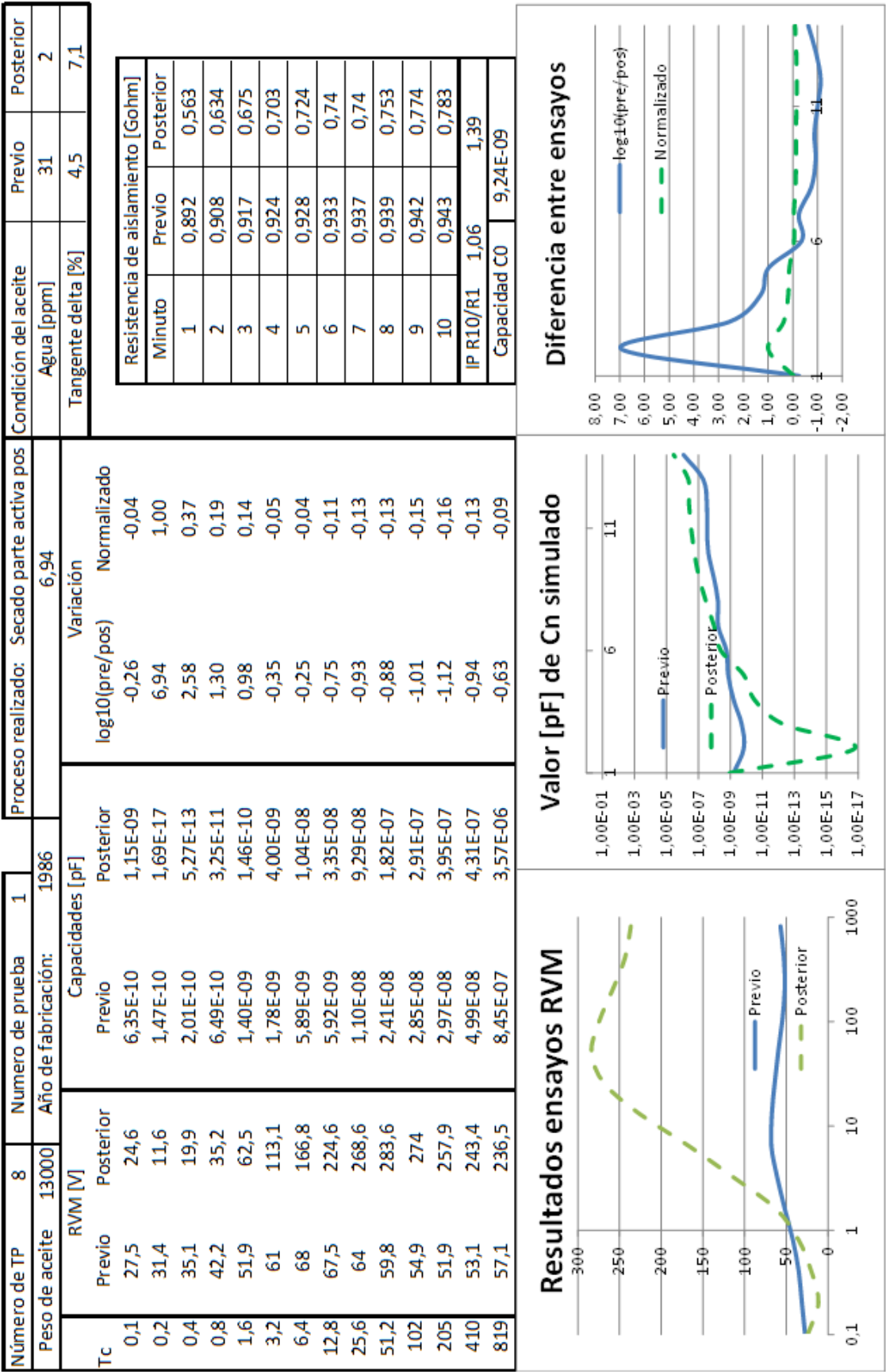


Figura 131 Cuadro resumen, Tp8 ensayo 1

7.4.12 Transformador 8 ensayo 2

En este caso se presenta la evolución del transformador número 8 una vez ha transcurrido un año desde el tratamiento que de secado de parte activa que ha sido descrito en el epígrafe anterior.

Tabla 34 Condición del aceite previo, posterior a un proceso de secado y transcurrido un año tras el tratamiento

<i>Condición del aceite</i>	<i>Estado inicial</i>	<i>Tras el tratamiento</i>	<i>Un año después</i>
<i>Agua [ppm]</i>	31	2	11
<i>Tangente delta [%]</i>	4,5	7,1	4,6

El transformador transcurrido un año ha alcanzado un estado en el que el agua ha aumentado en relación con los resultados obtenidos después del tratamiento, esto puede ser debido a diversas causas endógenas cómo puede el proceso de despolimerización del papel, o agua ya existente y no extraída que ha migrado desde las capas más profundas de papel hacia el aceite, fruto de los ciclos de calentamiento enfriamiento, o de origen exógeno como puede ser la penetración de humedad desde el exterior en el transformador.

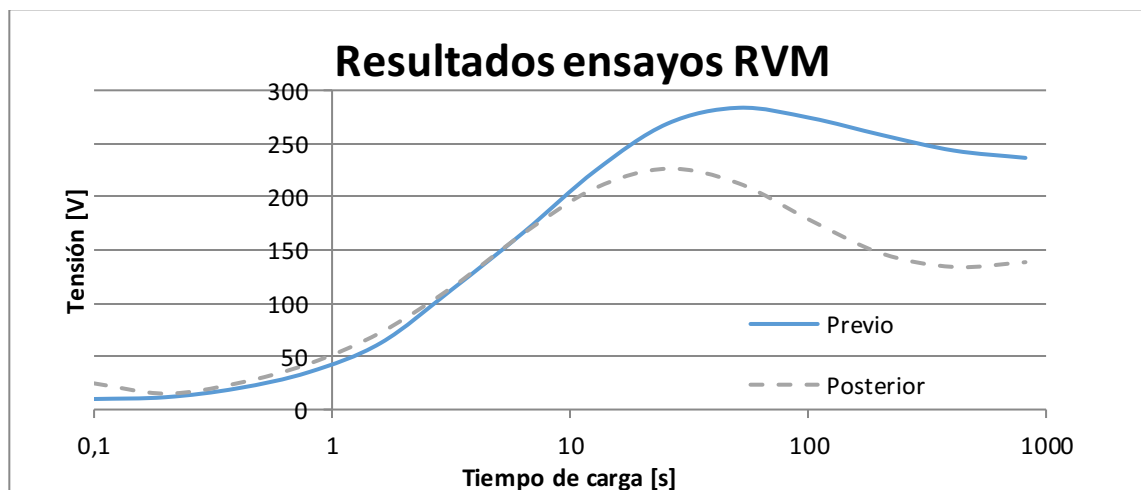


Figura 132 RVM trafo 8 prueba 2

La representación de la tensión de reabsorción de acuerdo al sistema tradicional (figura 132) es coherente con los resultados obtenidos en los ensayos del aceite, los ciclos de tiempos más bajos, aproximadamente hasta los 3,2 segundos, alcanzan valores ligeramente superiores en el ensayo posterior (transcurrido un año) que en el ensayo previo, que corresponde a después del tratamiento, lo cual representa o puede afirmarse que está alineado con el aumento del valor de humedad. Para tiempos superiores a los 3,2 segundos puede ser observado como la curva alcanza valores de tensión inferiores, aun cuando es una curva claramente determinada por la polarización interfacial el menor factor de pérdidas dieléctricas encajaría con una disminución de la tensión alcanzada, si bien hay que tener en cuenta otro factor de escala que desplaza la curva verticalmente que es el valor de la resistencia de aislamiento que es sensiblemente menor al año que después del tratamiento.

Tabla 35 Valor de resistencia en GOhm tras el tratamiento de secado y transcurrido un año de este.

Minuto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tras el tratamiento	1,47	1,6	1,67	1,71	1,74	1,76	1,76	1,78	1,81	1,83
Transcurrido un año	0,56	0,63	0,68	0,7	0,72	0,74	0,75	0,77	0,77	0,78

El hecho de que la resistencia sea prácticamente la mitad en el ensayo transcurrido un año, se muestra como un hándicap adicional a la interpretación de la curva representada de la manera tradicional.

La representación de los valores de capacidad del circuito equivalente de Debye muestran una evolución inversa a la descrita en el epígrafe anterior, las ramas entre la 1 y la 6 muestran una mayor capacidad es decir una mayor polarización, fruto del aumento de la cantidad de humedad presente en el aceite y en la interface papel aceite, así como una disminución de esta misma capacidad muy leve en las ramas superiores a la número 6, indicativas de una disminución de la cantidad de compuestos polares presentes, esto es debido a que ha precipitado parte de los lodos que habían sido removidos durante el tratamiento de secado, parte de ellos se han depositado sobre los aislantes sólidos, lo que es muy negativo y otra parte estará depositado en el fondo de la cuba, donde su efecto no es tan pernicioso o incluso puede ser calificado de inocuo.

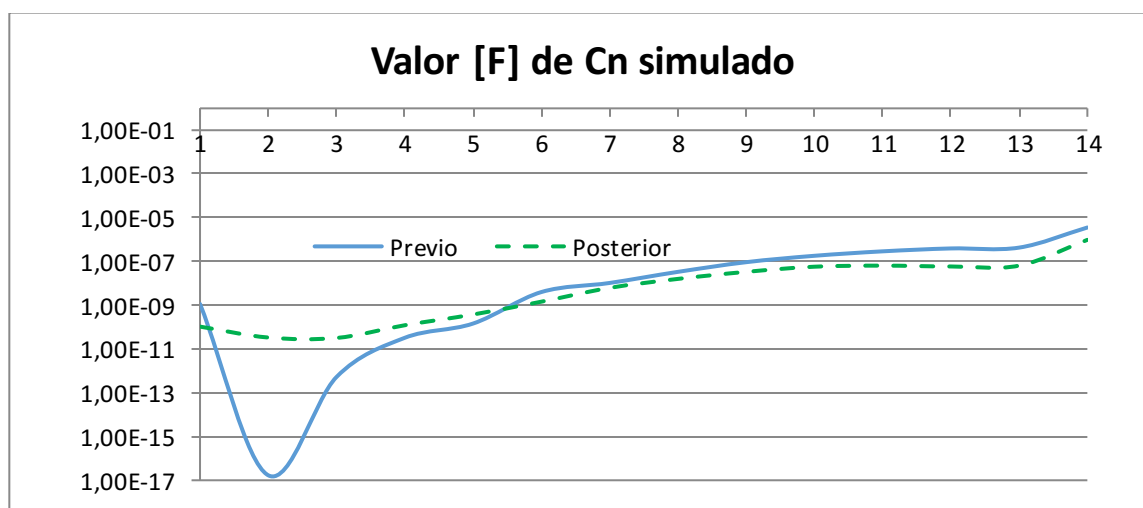


Figura 133 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

En el caso de estudiarse la variación de la condición entre el transformador en su estado inicial, previo al tratamiento de secado llevado a cabo y transcurrido un año desde que se ha ejecutado dicho tratamiento (figura 134), puede ser observado un resultado en línea con lo esperado.

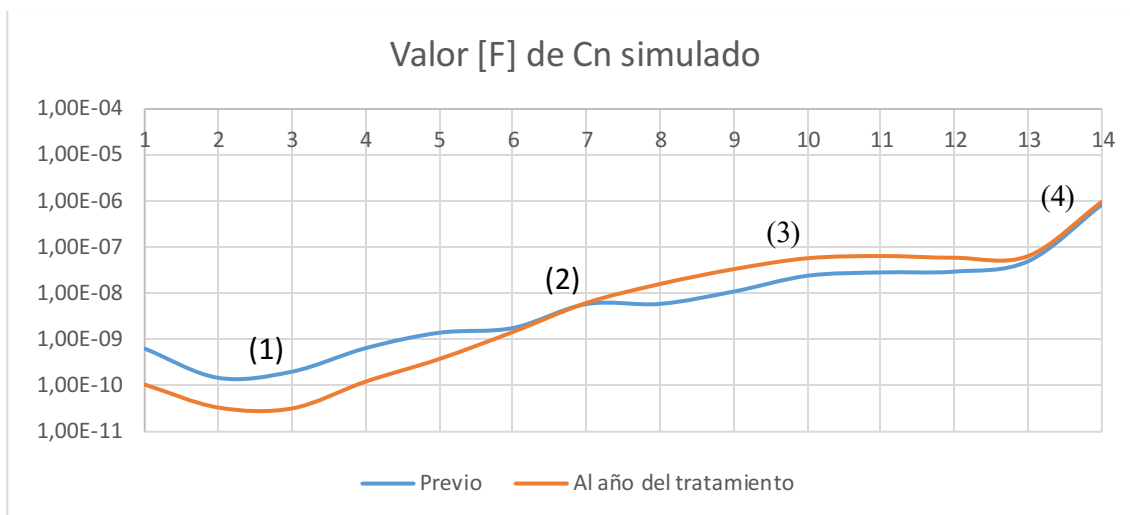


Figura 134 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente antes del tratamiento y posterior al tratamiento.

Se observa que se han formado cuatro áreas o zonas de influencia, en dos de ellas puede ser apreciada la evolución, mientras que en otras dos una por ser la transición y otra al ser tiempos tan altos más asociada a la condición del aislamiento sólido en las que no ha existido evolución alguna. Estas áreas son:

1. Una primera área que comprende las 6 primeras ramas, las cuales se asocian con el contenido en humedad del transformador, que ha descendido y por ello la energía acumulada en sus mecanismos de polarización ha descendido, lo cual se corresponde con el descenso de la capacidad de estas ramas. Adicionalmente la extensión a las 6 primeras ramas de este efecto de deshidratación se debe a que el tratamiento llevado a cabo ha sido un secado de parte activa, como ha sido descrito en otros ejemplos en el caso de procesos de reacondicionado solo son sensibles las tres o cuatro primeras ramas en función del caso.
2. Una zona de transición entre el agua y los compuestos polares responsables de los efectos de polarización interfacial.
3. Las ramas comprendidas entre la 7 y la 12, las cuales son asociadas a los compuestos polares y lodos responsables de los efectos de polarización interfacial, si bien la cantidad de estos compuestos presentes en el transformador no ha variado dado que no se ha realizado un procedimiento que reduzca la presencia de los mismos, un tratamiento en el que se vacía y se llena una serie de veces el transformador, arrastrará muchos de esos lodos ya posados en el fondo, contaminando la superficie de los aislantes sólidos, de ahí el aumento de los efectos de la polarización interfacial.
4. Esta última zona o área, no ha variado su condición ni su capacidad tras el proceso realizado en el transformador, quiere decir que aquellos mecanismos de polarización más lentos, como puede ser la polarización orientacional del papel, muy lenta al tener que orientar largas cadenas de polímeros no ha variado, y por lo tanto la condición del papel no ha variado tras un año desde el tratamiento.

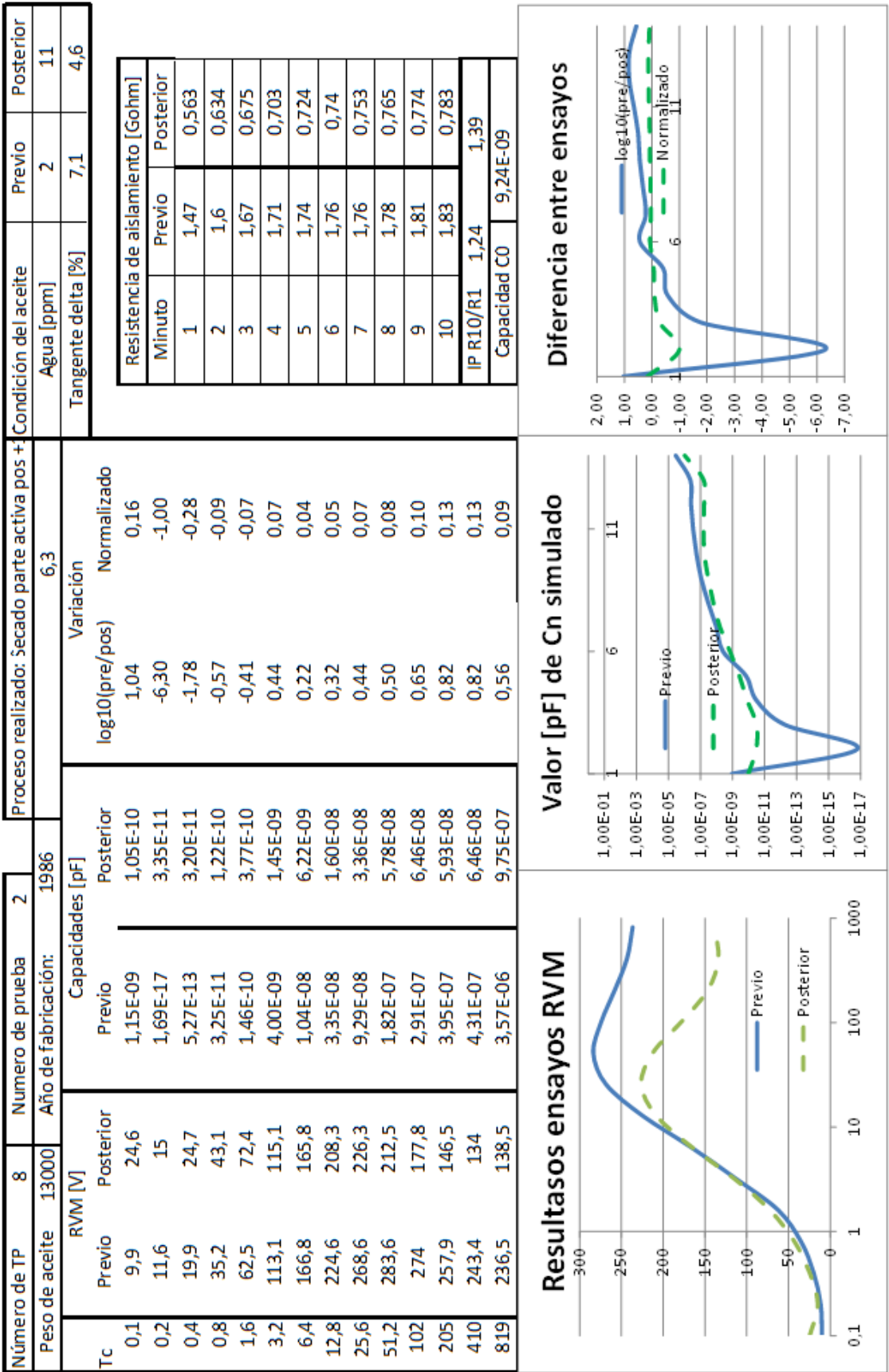


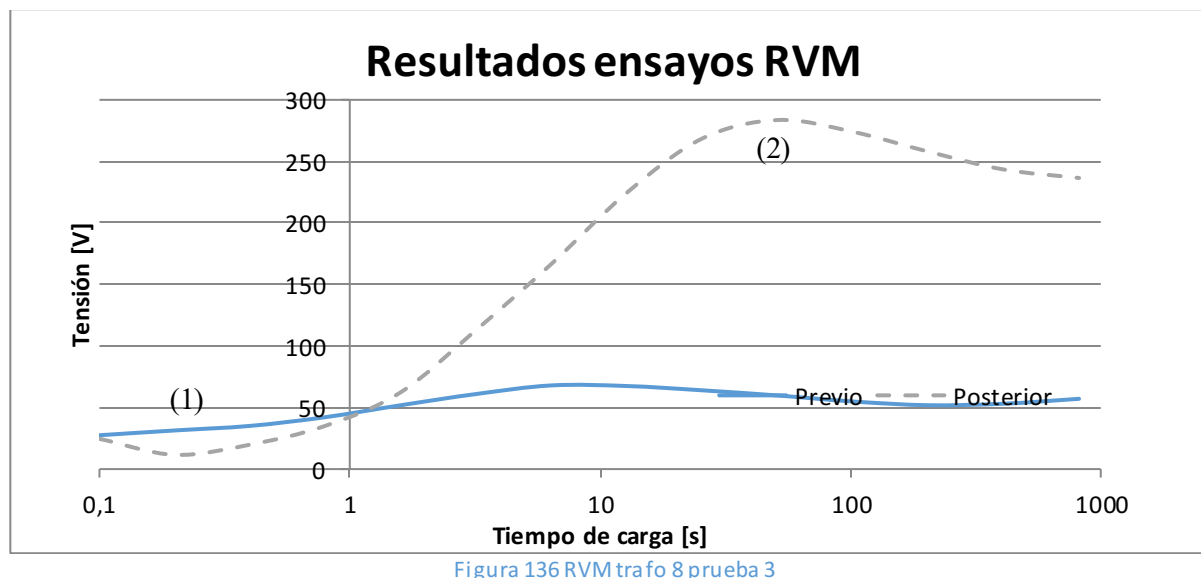
Figura 135 Cuadro resumen, Tp8 ensayo 2

7.4.13 Transformador 8 ensayo 3

Esta prueba evaluará el proceso de secado del transformador ya evaluado en los apartados 7.4.11 y 7.4.12 con la diferencia de que los ensayos han sido realizados invirtiendo la polaridad del condensador equivalente, es decir la inyección de tensión se realiza en el devanado de BT y se aterriza el devanado de AT, variando la geometría y por lo tanto la Co del circuito equivalente de Debye.

Del estudio de los resultados obtenidos mediante la representación tradicional del ensayo, no es posible extraer conclusiones que difieran de las ya obtenidas al realizar el ensayo energizando por AT.

La lectura de los resultados indicada en el apartado 7.4.11 es: *“En el ensayo de RVM representado mediante la representación tradicional, observamos una evolución atípica, se observa que en los tiempos de polarización bajos ($t < 1\text{sg}$) el valor de la tensión alcanzada ha disminuido notablemente, lo que sería interpretable como una disminución del contenido de humedad (1), si bien, pese a la disminución del valor de resistencia los valores alcanzados en los tiempos medios y altos es sustancialmente mayor (2), este incremento del valor de tensión alcanzado tiene dos lecturas, por un lado la mejoría por la deshidratación del papel y el aceite, y por otro lado es achacable al aumento del factor de pérdidas dieléctricas y a una mayor contribución de la polarización interfacial.”* Si se observa la figura 136 la lectura es exactamente la misma, quizás la diferencia resaltada en la zona (1) es un poco más evidente.



De igual manera si evaluamos el valor de capacidad de las ramas obtenidas en el circuito equivalente de Debye la evaluación es prácticamente la misma que la realizada en el apartado 7.4.11: *“La superposición de las respuestas previa y posterior al tratamiento permite observar dos áreas, las ramas de la 1 a la 6 (1) que como se ha observado en los casos anteriores han sido sensibles al tratamiento de secado de parte activa, si bien es necesario reseñar que al tratarse de un tratamiento de secado de parte activa la extensión de las ramas afectadas es más amplia que cuando se trata de un reacondicionado, y un segundo efecto indeseado (2) en las ramas a partir de la 6 en las que el valor de capacidad aumenta, efecto contrario al observado cuando se hace una regeneración, este efecto está en línea con el aumento del*

factor de pérdidas dieléctrico observado en los análisis fisicoquímicos del aceite presentados en la tabla 32 y al mal comportamiento del valor de resistencia óhmica de devanados presentado en la tabla 33.” De igual manera que en la evaluación en base a la representación tradicional la diferencia más notable es que la zona marcada con (1) correspondiente a la humedad quizás muestre una diferencia mucho más evidente.

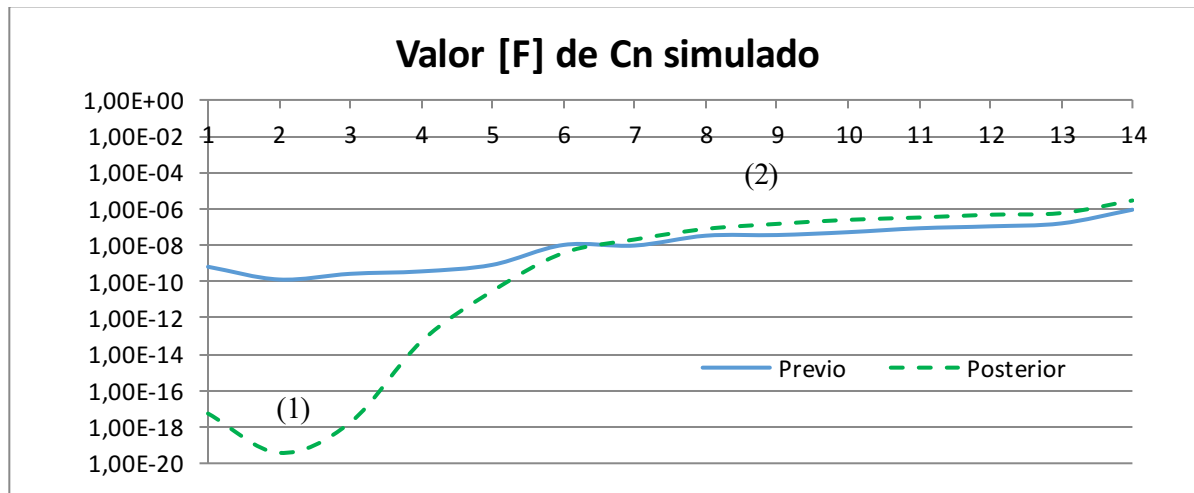


Figura 137 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

Una vez evaluada la prueba del transformador 8 prueba 4 en la que se repite este mismo ejercicio con el ensayo transcurrido un año se hará un análisis de las conclusiones que se pueden extraer, si bien una primera conclusión irá en línea con lo expuesto en el apartado 5.2.2, en el que se indica que la variación de la capacidad actuará como factor de escala pero que en ningún caso desplazará la constante de tiempo, ni los tiempos de las ramas de polarización.

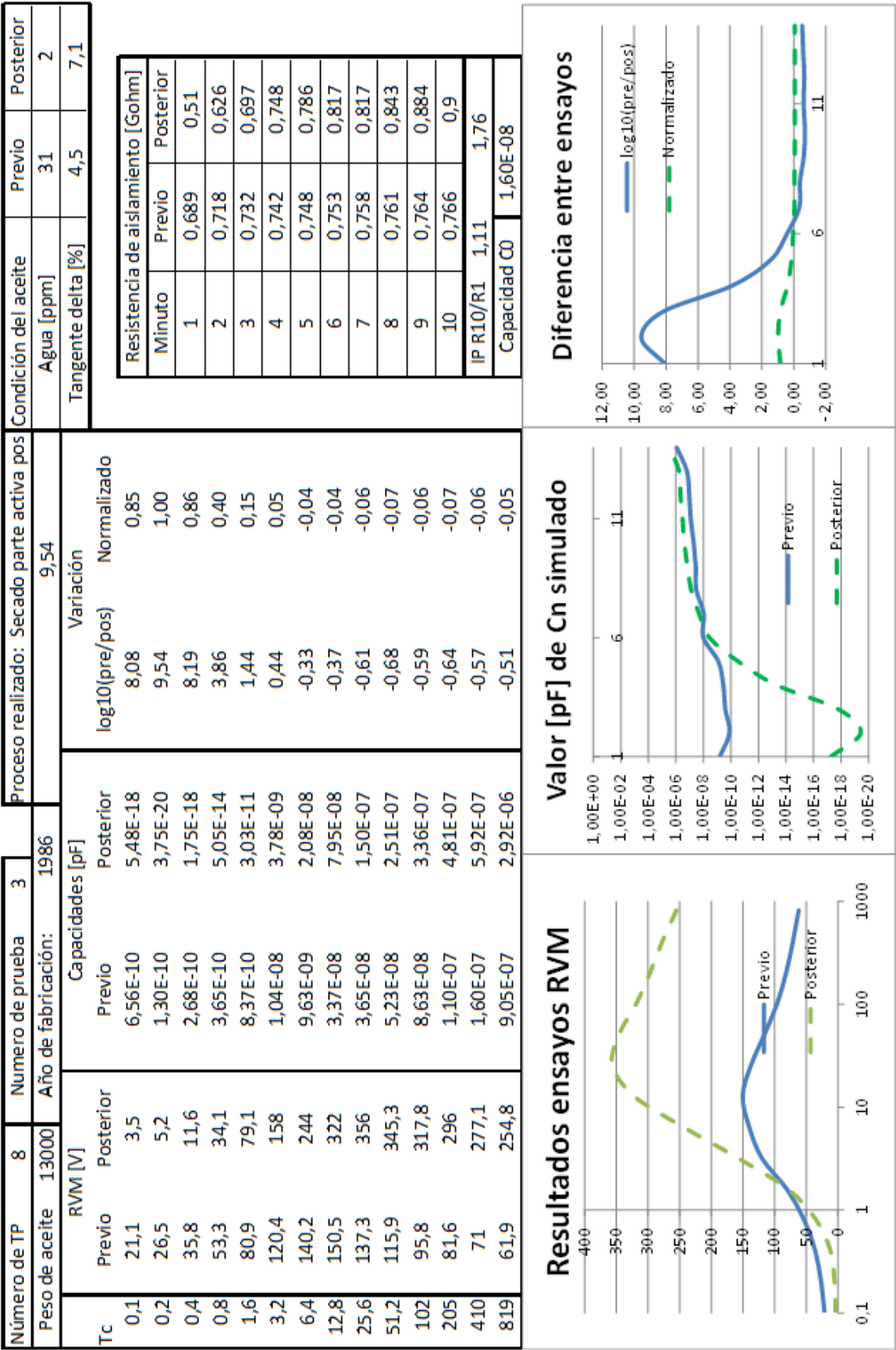


Figura 138 Cuadro resumen, Tp8 ensayo 3

7.4.14 Transformador 8 ensayo 4

De la misma forma que ha sido presentado para el transformador 8 prueba 3 en este epígrafe se presenta un ejercicio similar, consistente en la evaluación e los resultados obtenidos en los ensayos transcurrido un año desde el secado de la parte activa del transformador, estos son semejantes a los presentados en el apartado 7.4.12 “Transformador 8 ensayo 2” si bien se ha realizado el ensayo inyectando tensión por el lado de BT y aterrizando el lado de AT.

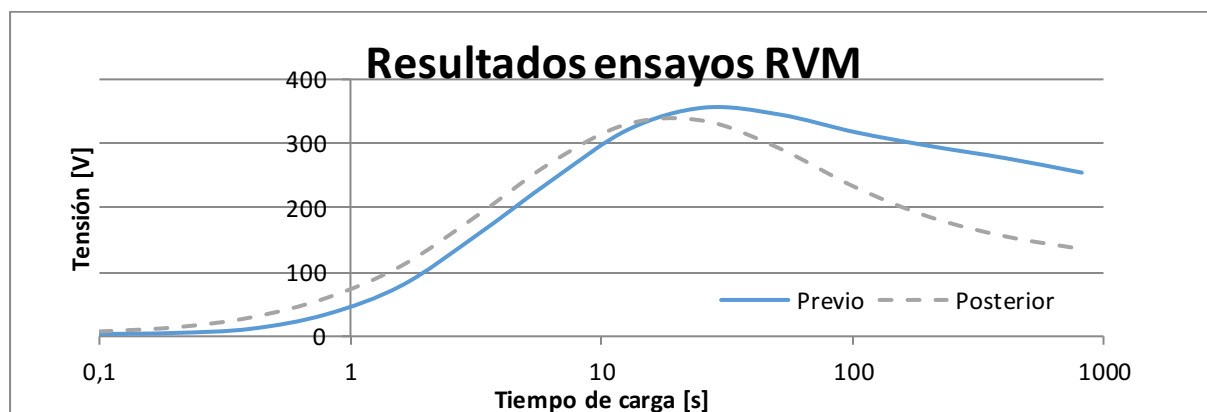


Figura 139 RVM trafo 8 prueba 4

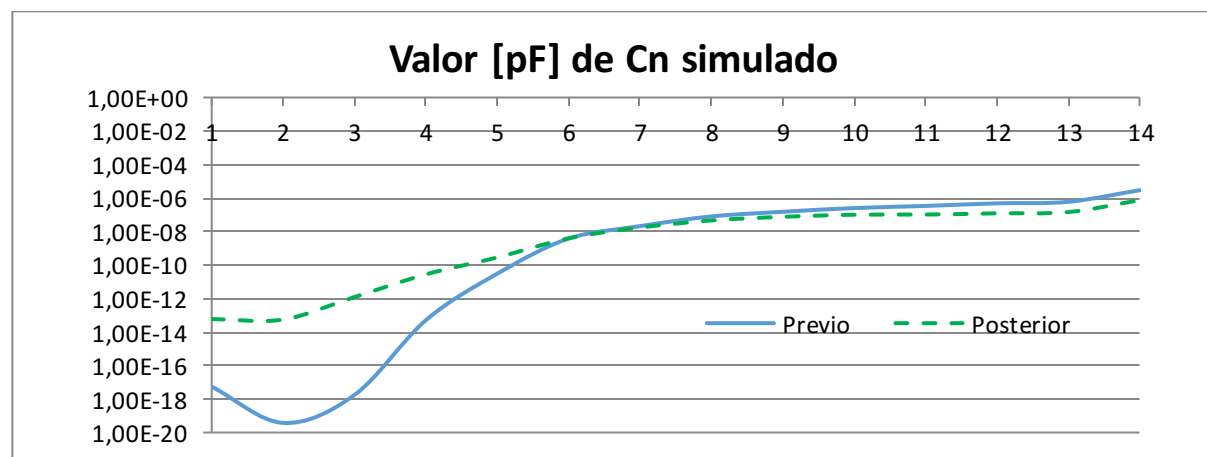


Figura 140 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

De igual manera a lo indicado en epígrafe anterior la lectura es prácticamente la misma que la realizada para la prueba transformador 8 prueba 2 que es la equivalente a la aquí presentada con la diferencia de que se ha energizado desde el lado de AT en lugar que desde el lado de BT como es el caso.

Las conclusiones en lo referente al circuito equivalente serán las ya indicadas, siendo un nuevo ejemplo de cómo la variación en C_0 solo escalará el resultado, si bien la morfología de la curva no se alterará, y en lo referente a los efectos prácticos del tratamiento puede ser afirmado que el secado ha sido eficiente y que ambos devanados han experimentados mejoras semejantes, tanto los devanados de AT como los devanados de BT, en este caso y al tratarse de un tratamiento muy agresivo y profundo como un secado de devanados, ambos devanados muestran evoluciones semejantes, en tratamientos no tan profundos como norma general el devanado de BT que suele ser el más interno es más costoso lograr mejorías semejantes a las del devanado de AT que suele ser el más superficial.

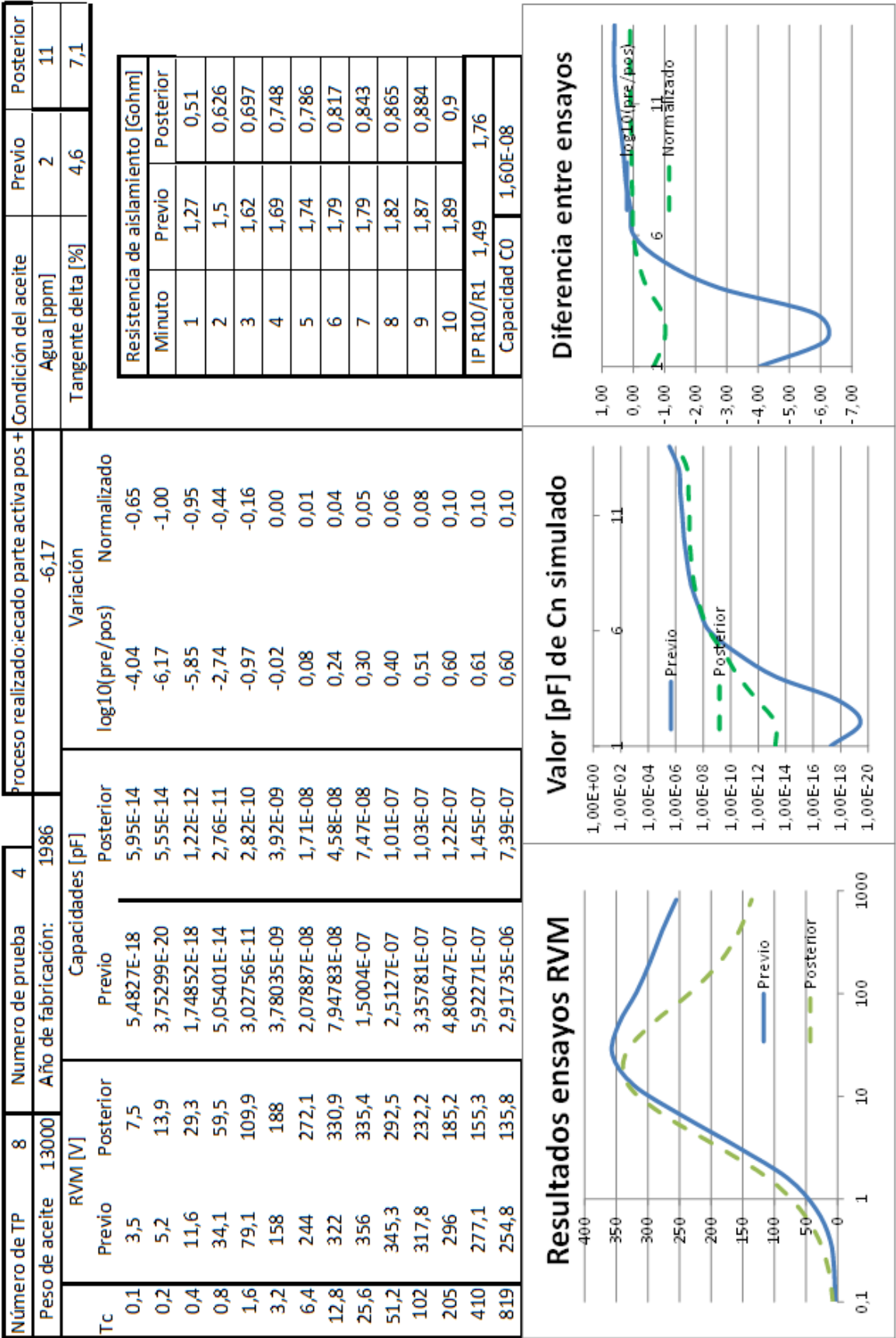


Figura 141 Cuadro resumen, Tp8 ensayo 4

7.4.15 Transformador 9 ensayo 1

El transformador presentado en este caso es un transformador sobre el que se ha realizado un procedimiento de regeneración. Como se muestra en los ensayos fisicoquímicos realizados, el dieléctrico líquido ha mejorado notablemente su condición, en especial su factor de pérdidas dieléctricas tras la aplicación del proceso indicado.

Tabla 36 Condición del aceite previo, posterior a un proceso de regeneración y reacondicionado

Condición del aceite	Previo	Posterior
Agua [ppm]	22	14
Tangente delta [%]	17,5	4,9

La evaluación del ensayo en base a las curvas tradicionales de representación de la RVM pone de manifiesto cierta mejoría si bien el transformador antes y después de la regeneración sigue manteniendo un perfil de curva típica de transformador aquejado de polarización interfacial a causa de las partículas polares presentes en la interface papel aceite.

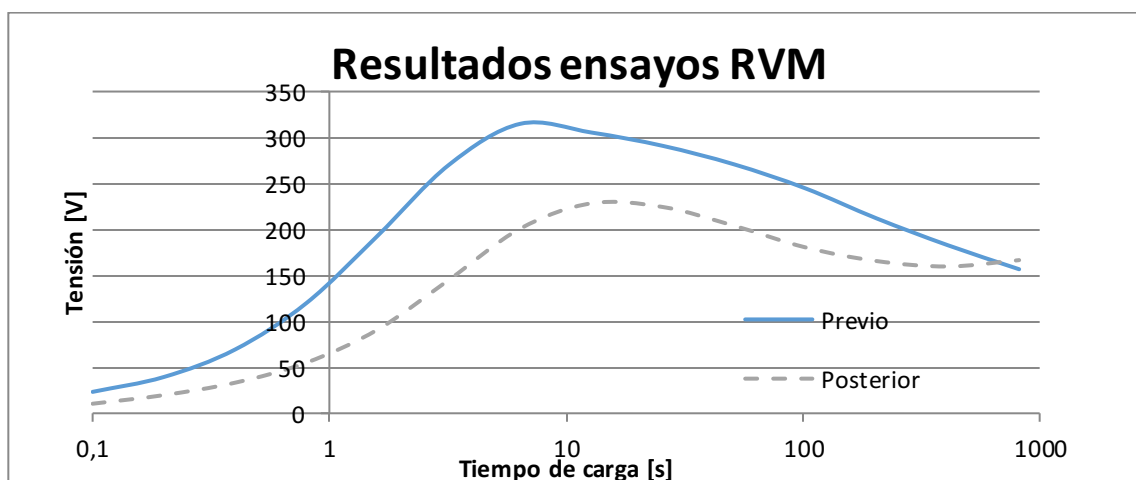


Figura 142 RVM trafo 9 prueba 1

En la figura anterior se puede observar tan solo que la constante de tiempo ha mejorado levemente, si bien al hacer la interpretación en base a la representación de los valores de las capacidades del circuito equivalente de Debye podemos profundizar más en la interpretación de la diferencia entre curvas.

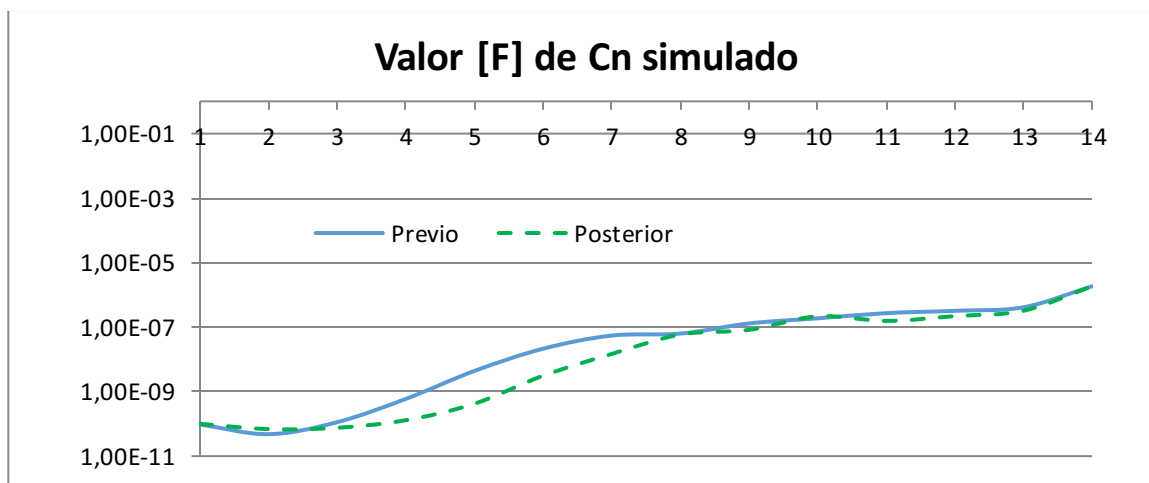


Figura 143 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

En base a lo que se puede apreciar en la figura 143 se observa que las primeras ramas de la 1 a la 3 no han tenido sensibilidad alguna al cambio de condición del transformador lo que está en línea con la leve variación del contenido de humedad observado en el análisis físico químico. El mismo efecto puede ser observado en las ramas de la 8 a la 14 por lo que únicamente las ramas comprendidas entre la 4 y la 7 han mostrado sensibilidad, este hecho es coincidente con las observaciones realizadas en los casos anteriores en los que ya ha sido indicado que la eliminación de compuestos polares queda reflejada en dichas ramas.

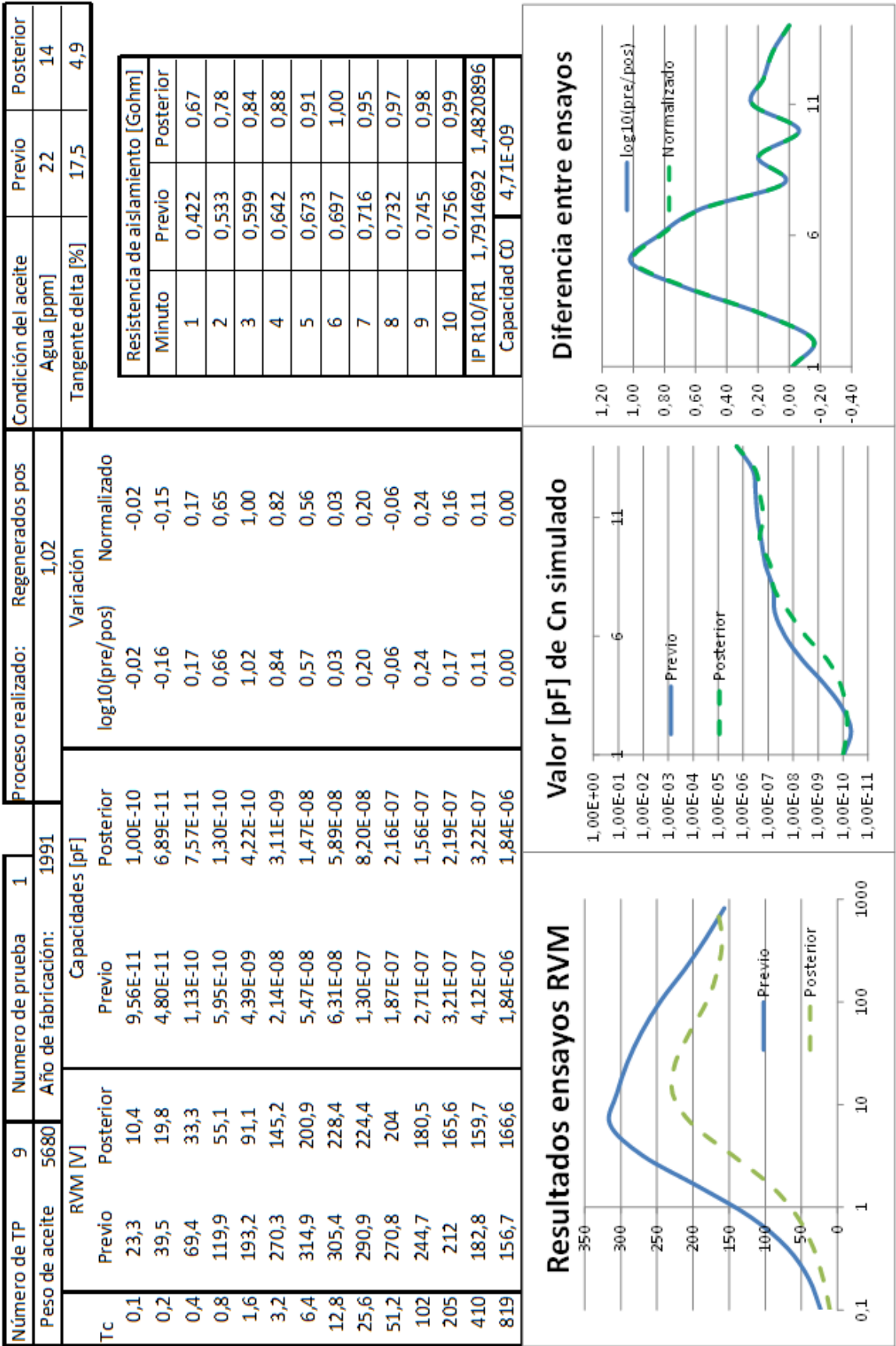


Figura 144 Cuadro resumen, Tp9 ensayo 1

7.4.16 Transformador 10 ensayo 1

En este caso se presenta un transformador, el cual ha sido sometido a un proceso de reacondicionado para extraer la humedad presente en el aceite, posterior al tratamiento de reacondicionado se llevó a cabo un proceso de regeneración el cual será objeto de estudio en el apartado “Transformador 10 ensayo 2”.

Tabla 37 Condición del aceite previo y posterior a un proceso de reacondicionado

Condición del aceite	Previo	Posterior
Agua [ppm]	9	4
Tangente delta [%]	10,85	9,8

El empleo de la representación tradicional no permite extraer conclusiones de una forma sencilla, dado que se muestra una curva que presenta signos de estar afectada por polarización interfacial, si bien se puede apreciar como la pendiente inicial es sensiblemente más tendida en el ensayo posterior al tratamiento (1), los tiempos bajos son donde típicamente se aprecia en mayor medida el efecto de la humedad presente en el transformador.

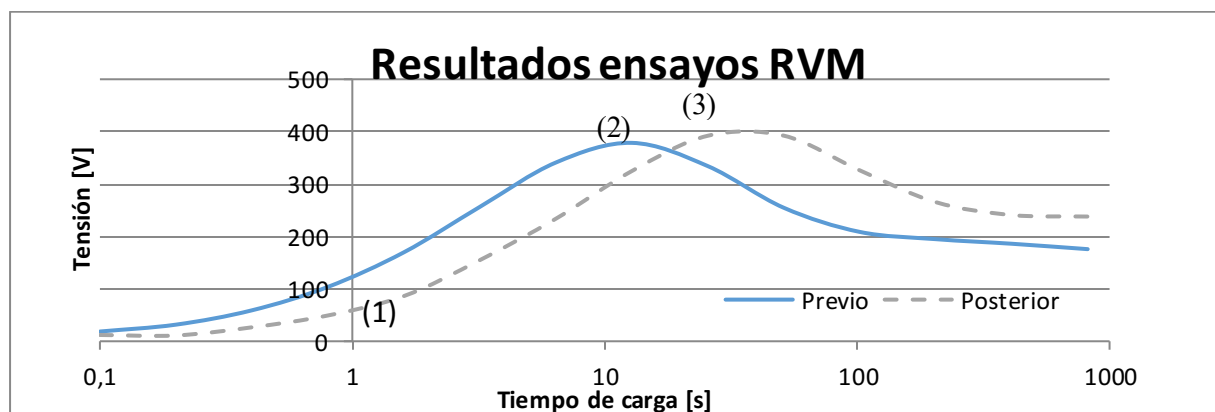


Figura 145 RVM trafo 10 prueba 1

Otra lectura que puede ser extraída de la figura 145 es que realmente el grado de afección por polarización interfacial no es muy elevado dado que se observa que adicional al cambio en la pendiente de salida de la curva, el valor de constante de tiempo ha mejorado sustancialmente evolucionando de unos 10 segundos (2) en el ensayo previo al tratamiento a unos 30 segundos (3) en el ensayo posterior al tratamiento.

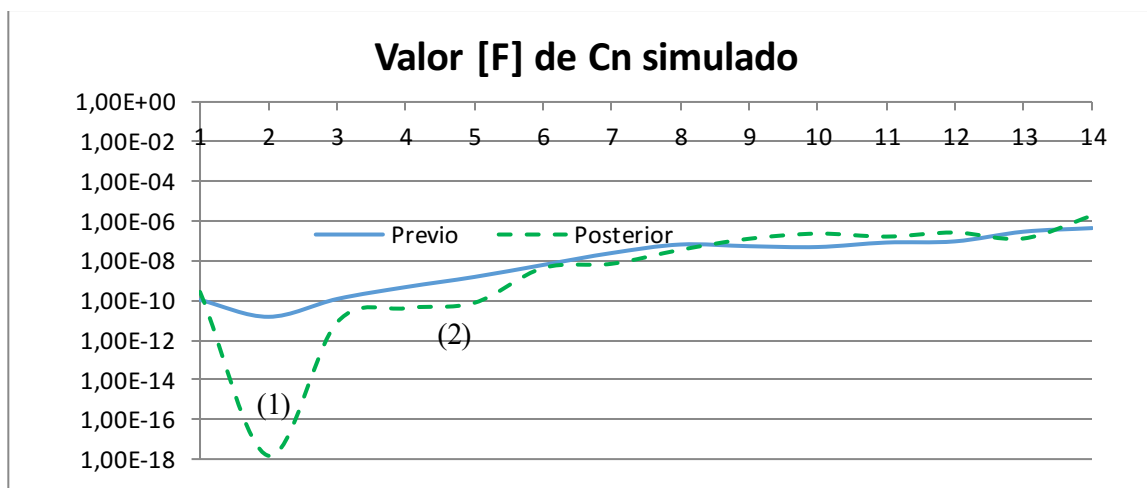


Figura 146 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

Del estudio de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente de Debye se puede apreciar como el tratamiento de reacondicionado solo ha tenido efecto en la segunda rama de polarización (1), este efecto está alineado con lo que se viene observando en los casos analizados con anterioridad. Es digno de mención una pequeña variación en las ramas 4 y 5 (2) las cuales normalmente son relacionadas con la eliminación de compuestos polares en los tratamientos de regeneración, esto se puede explicar y tiene reflejo en los valores obtenidos de factor de pérdidas dieléctricas presentados en la tabla 37 en la que puede observarse una disminución de prácticamente un 1% en el factor de pérdidas, evolucionado de un 10,85% a un 9,8%, lo cual puede ser debido a que se han arrastrado compuestos polares de la superficie de los devanados durante el tratamiento.

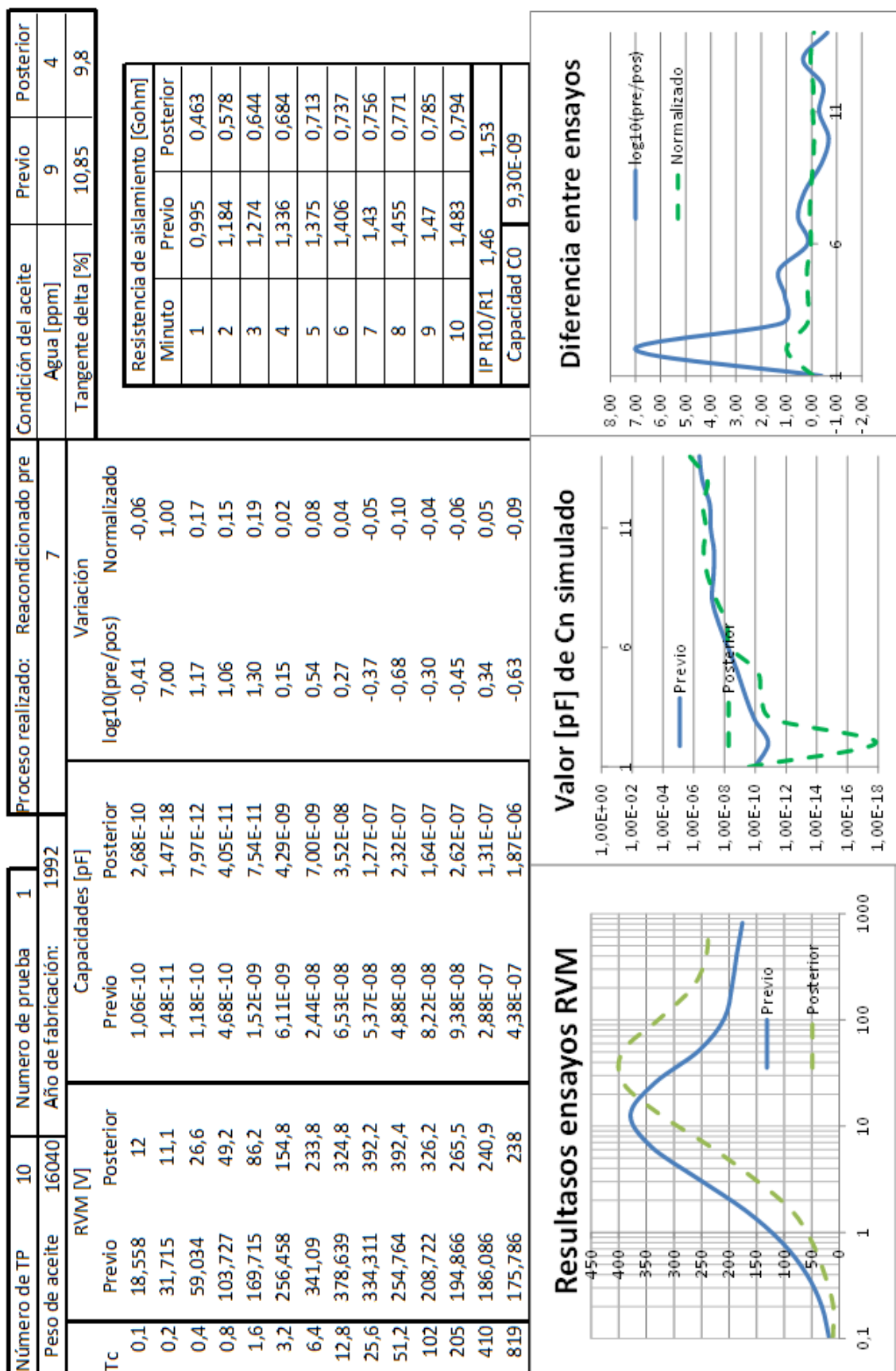


Figura 147 Cuadro resumen, Tp10 ensayo 1

7.4.17 Transformador 10 ensayo 2

En este caso en el transformador presentado en el caso anterior, posterior al tratamiento de reacondicionado ya descrito, ha sido realizado un tratamiento de regeneración a fin de eliminar los compuestos polares presentes en el dieléctrico del transformador, en la tabla 38 puede ser apreciado como el valor de pérdidas dieléctricas disminuye sensiblemente al mismo tiempo que el contenido de humedad producto del reacondicionado ejecutado anteriormente se mantiene en valores muy bajos.

Tabla 38 Condición del aceite previo y posterior a un proceso de regeneración

<i>Condición del aceite</i>	<i>Previo</i>	<i>Posterior</i>
<i>Agua [ppm]</i>	4	3
<i>Tangente delta [%]</i>	9,8	2,7

En la representación tradicional de los resultados del ensayo de RVM puede ser apreciado como la constante de tiempo evoluciona muy positivamente, abandonando los tiempos medios de la gráfica hasta valores más elevados propios de un transformador en una condición buena a pesar de tener cerca de 25 años de antigüedad.

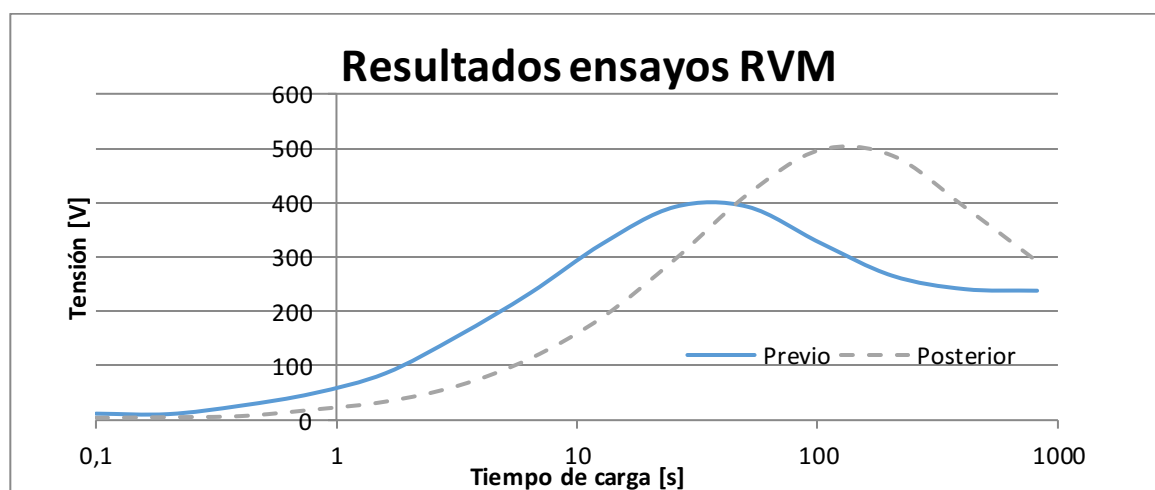


Figura 148 RVM trafo 10 prueba 2

La representación del valor de la capacidad de las distintas ramas (figura 149) de polarización del circuito equivalente de Debye muestra en las primeras tres ramas una morfología típica de transformador que ha sido deshidratado, existiendo una concavidad muy pronunciada (1), propio del tratamiento que se ha realizado previamente y ya expuesto en el apartado 7.4.16.

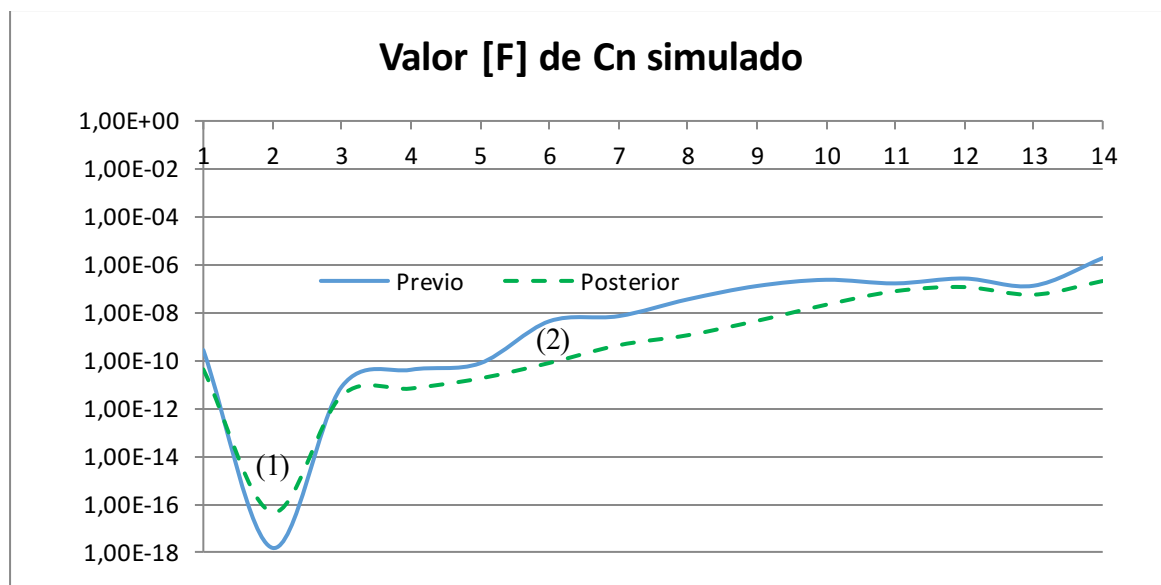


Figura 149 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

Acorde al tratamiento realizado de regeneración, se puede apreciar como las ramas desde la 4 pero fundamentalmente desde la rama número 5 hasta la rama número 11 en las que puede ser apreciada una disminución de la capacidad, siendo estas las ramas que típicamente muestran sensibilidad a la eliminación de los compuestos polares presentes en el dieléctrico.

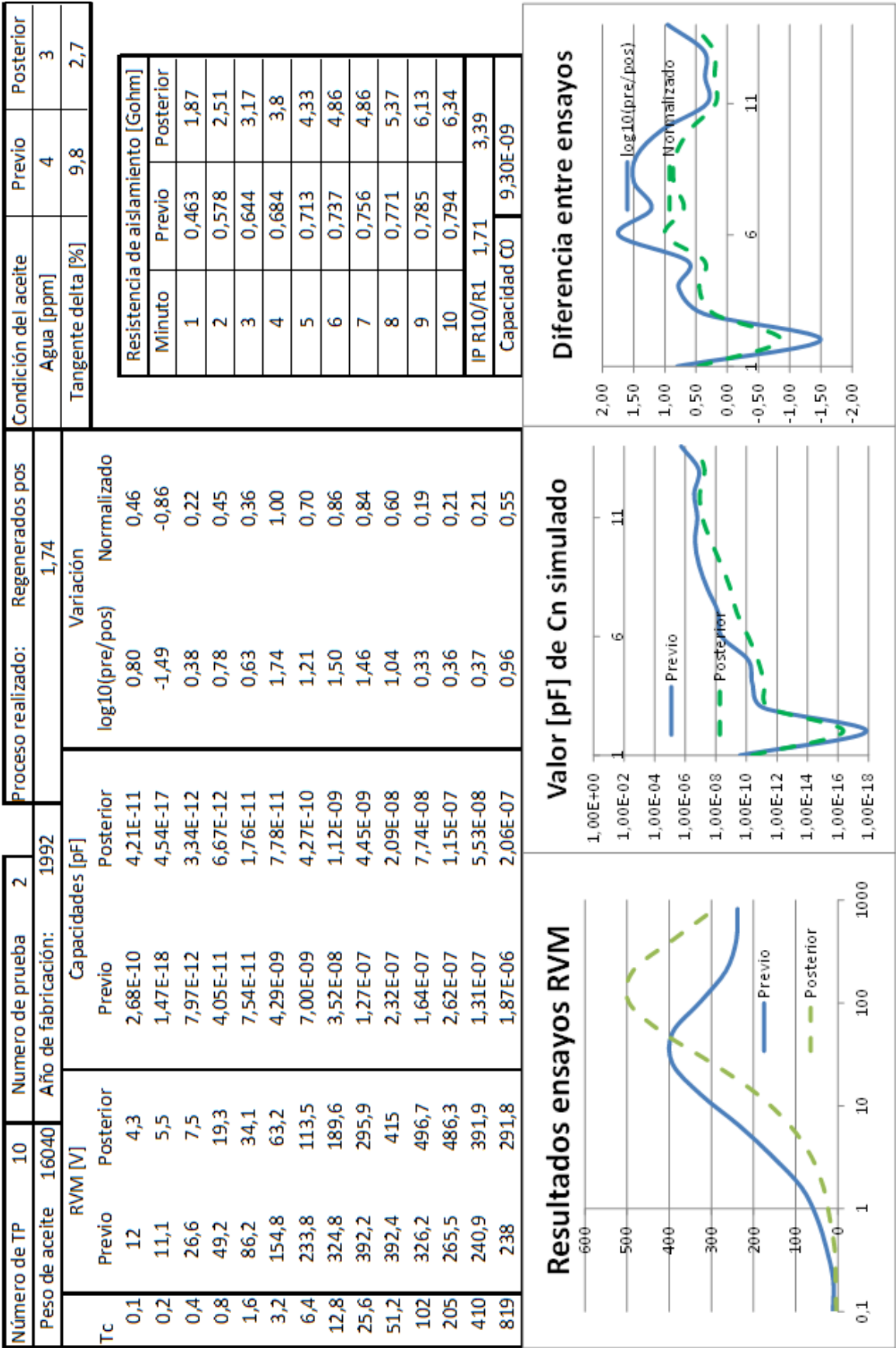


Figura 150 Cuadro resumen, Tp10 ensayo 2

7.4.18 Transformador 11 ensayo 1

En este caso es analizado un transformador sometido a proceso de regeneración, en el que adicionalmente ha sido mejorado el contenido de humedad producto de la realización de un pequeño reacondicionado típico tras todo proceso de regeneración.

Tabla 39 Condición del aceite previo y posterior a un proceso de reacondicionado

Condición del aceite	Previo	Posterior
Agua [ppm]	14	7
Tangente delta [%]	12,7	2,6

La evaluación de la respuesta RVM en base a la representación de la tensión de pico en función del tiempo de carga que es decir la representación tradicional, permite observar que previo al tratamiento la respuesta obtenida mostraba un máximo absoluto en tiempos medios y con la morfología de una respuesta típica de un dieléctrico afectado por polarización interfacial. La curva posterior al tratamiento muestra una menor pendiente inicial y un máximo absoluto en el entorno de los 30 segundos indicativo de la mejoría, la disminución de la tensión de pico (diferencia entre (1) y (2)) se puede achacar a la mejoría de la resistencia de aislamiento como se puede apreciar en la tabla 40 que en este caso es muy acusada.

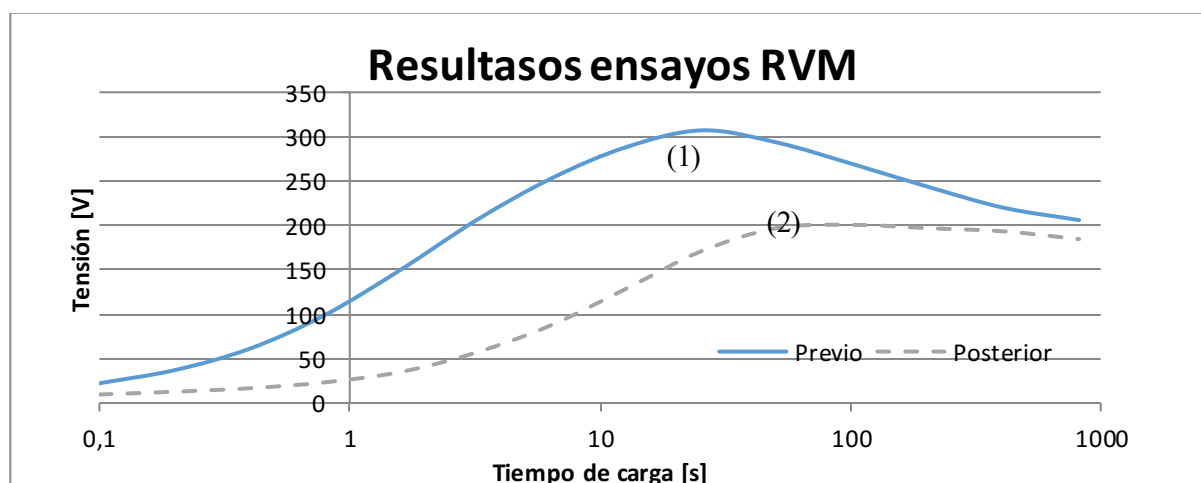


Figura 151 RVM trafo 11 prueba 1

Tabla 40 Evolución entre el minuto 1 y 10 de la resistencia de aislamiento antes y después del tratamiento expresado en GOhm

Minuto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Previo	0,49	0,57	0,61	0,64	0,66	0,67	0,69	0,7	0,71	0,71
Posterior	4,08	4,77	5,13	5,36	5,53	5,66	5,77	5,86	5,93	5,99

La evaluación de la capacidad de las 14 ramas del circuito equivalente de Debye muestra una gráfica en línea con lo que ha sido observado hasta el momento.

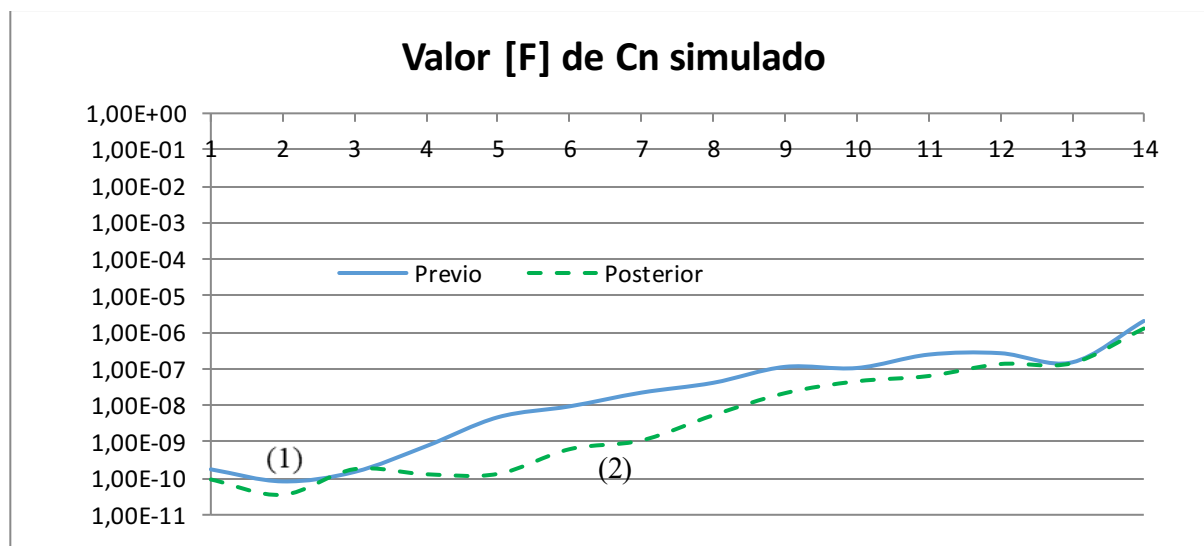


Figura 152 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

Pueden ser observadas dos zonas de influencia diferenciadas, por un lado, las ramas número 1 y número 2 que muestran una leve disminución de la capacidad, lo que está en línea con el reacondicionado realizado y con la disminución del contenido de humedad, si bien es muy leve, y una segunda zona separada que comprende las ramas entre la 4 y la 12 en el que se puede observar la disminución del valor de la capacidad indicativo de que esas ramas tienen menos capacidad fruto de la eliminación de los compuestos polares del dieléctrico del transformador.

Se puede decir que el tratamiento de regeneración del aceite ha sido exitoso en función de los valores físico químicos obtenidos, del mismo modo que se observa en el circuito equivalente de Debye como las ramas que han sido sensibles al tratamiento de las que se consideran sensibles a la eliminación de compuestos polares (2) tienen una extensión amplia.

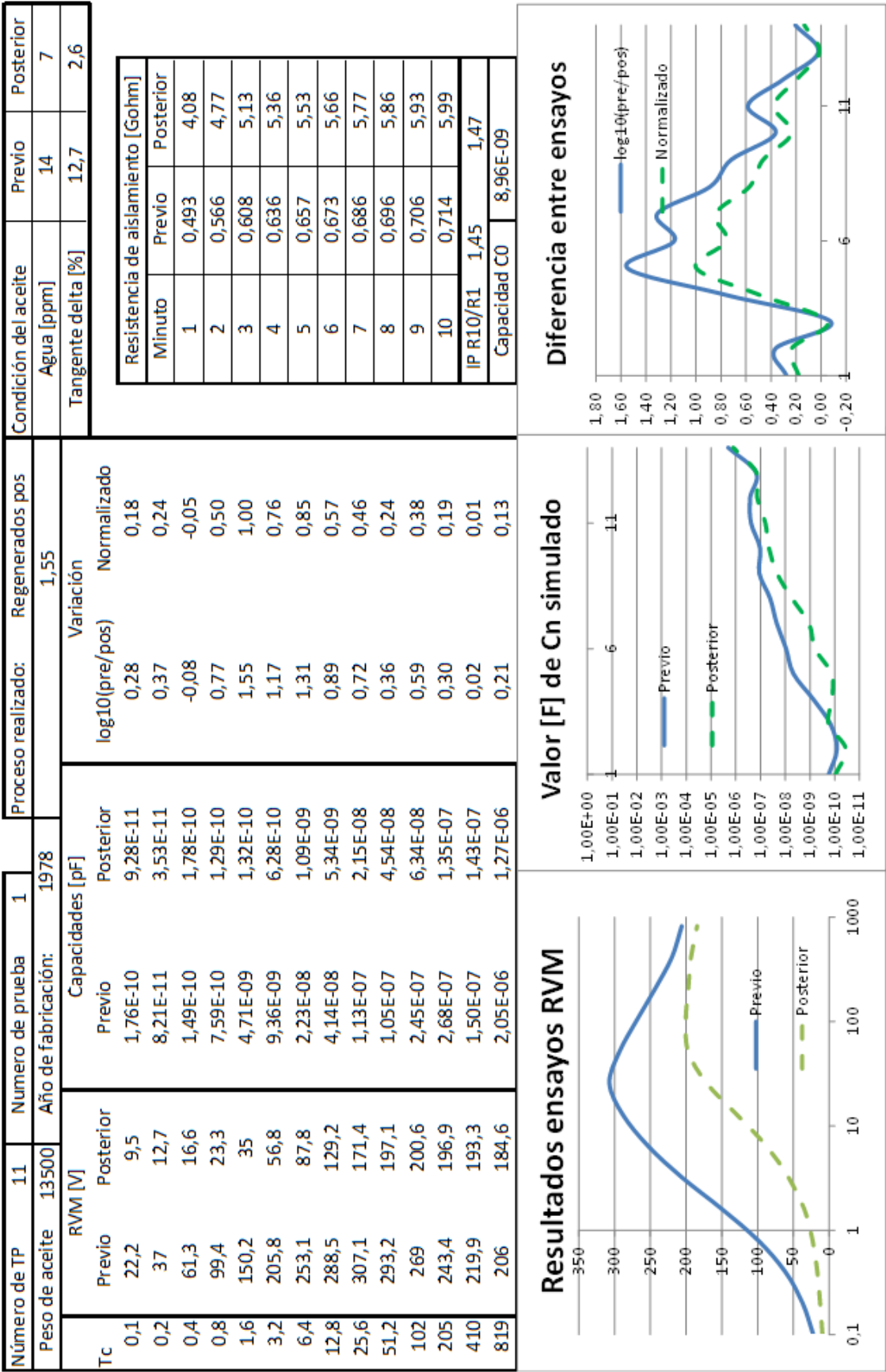


Figura 153 Cuadro resumen, Tp11 ensayo 1

7.4.19 Transformador 12 ensayo 1

Para el estudio del transformador nº12 como en otras ocasiones, va a ser analizado con los ensayos del transformador inyectando tensión desde el devanado de alta tensión, con el devanado de baja tensión aterrizado es decir el condensador equivalente será $C_a + C_{ab}$ y posteriormente se realizará el mismo ensayo inyectando a través del devanado de baja tensión con el devanado de alta tensión aterrizado por lo que el condensador equivalente será $C_b + C_{ba}$, hay que tener en cuenta que $C_{ab} = C_{ba}$ la capacidad del condensador no varía al variar la polaridad.

El procedimiento llevado a cabo ha sido una regeneración y como se puede observar en los valores fisicoquímicos obtenidos tras la regeneración no se ha reacondicionado o prácticamente no se ha reacondicionado el aceite dado que el contenido en humedad se mantiene constante.

Tabla 41 Condición del aceite previo y posterior a un proceso de regeneración

Condición del aceite	Previo	Posterior
Agua [ppm]	15	12
Tangente delta [%]	14,1	1,6

Si bien cómo puede ser apreciado en la tabla 41 los resultados obtenidos para el factor de pérdidas dieléctricas o tangente de delta muestra una variación apreciable, lo que hace pensar que el resultado del tratamiento ha sido bueno.

Tabla 42 Evolución entre el minuto 1 y 10 de la resistencia de aislamiento antes y después del tratamiento expresado en GOhm

Minuto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Previo	0,9	0,97	1,01	1,04	1,05	1,07	1,08	1,09	1,1	1,1
Posterior	5,27	6,92	7,98	8,67	9,2	9,56	9,56	9,85	10,3	10,5

En la tabla 42 se puede apreciar que el valor de la resistencia de aislamiento ha experimentado una mejoría notable multiplicándose el valor prácticamente por 10.

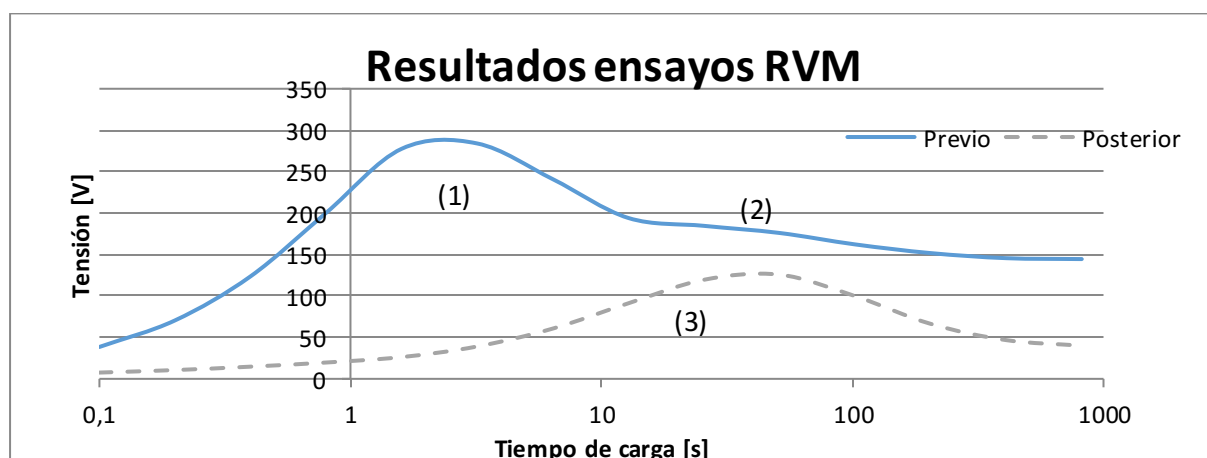


Figura 154 RVM trafo 12 prueba 1

La evaluación de la curva de respuesta de la RVM representada de acuerdo al método tradicional, resulta muy interesante ya que permite apreciar la curva previa un primer máximo absoluto (1) que habla de una muy fuerte polarización interfacial, si bien está muy concentrada por lo que no llega solapar la segunda mitad de la curva, así como se ha mostrado en el apartado 5.2.3.1 el efecto de las ramas con constante de tiempo bajo, no tienen influencia en los tiempos elevados, y es por eso que se intuye un segundo máximo relativo (2) en el entorno de los 40 segundos de constante de tiempo. Posteriormente una vez ejecutado el tratamiento se puede observar que el máximo (1) ha desaparecido de la curva posterior y que el máximo absoluto de esta nueva curva (3) se corresponde con el máximo relativo previamente identificado (2).

La representación de las capacidades de cada una de las 14 ramas de polarización del circuito equivalente de Debye muestra cómo las ramas entre la 5 y la 13 son sensibles a la variación de la condición del dieléctrico del transformados, siendo esta variación más acusada en las ramas de la 5 a la 7. Es de reseñar cómo al contrario de lo que se ha podido apreciar en aquellos casos en los que se ha realizado un reacondicionado la capacidad de las tres primeras ramas del circuito equivalente no han variado.

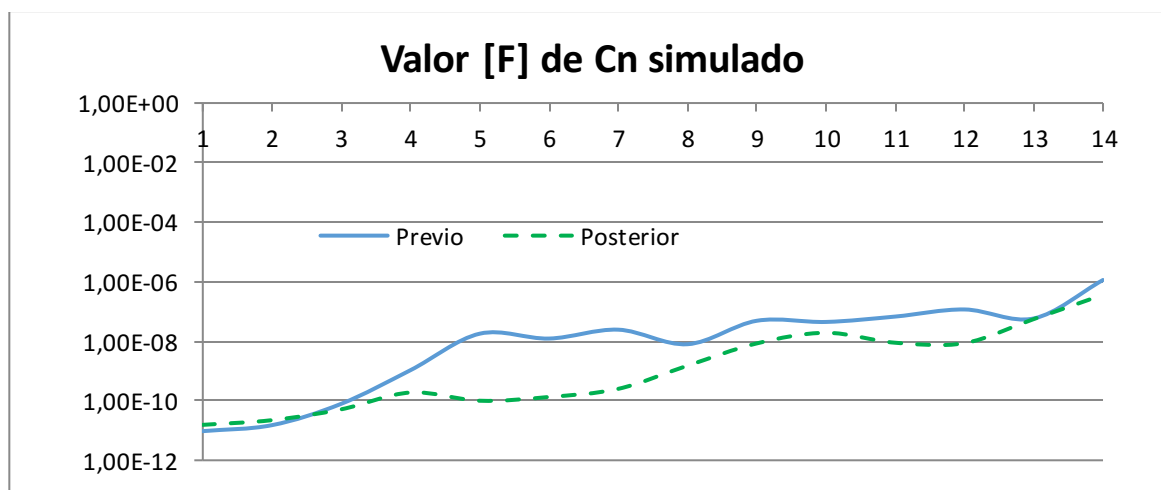


Figura 155 valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

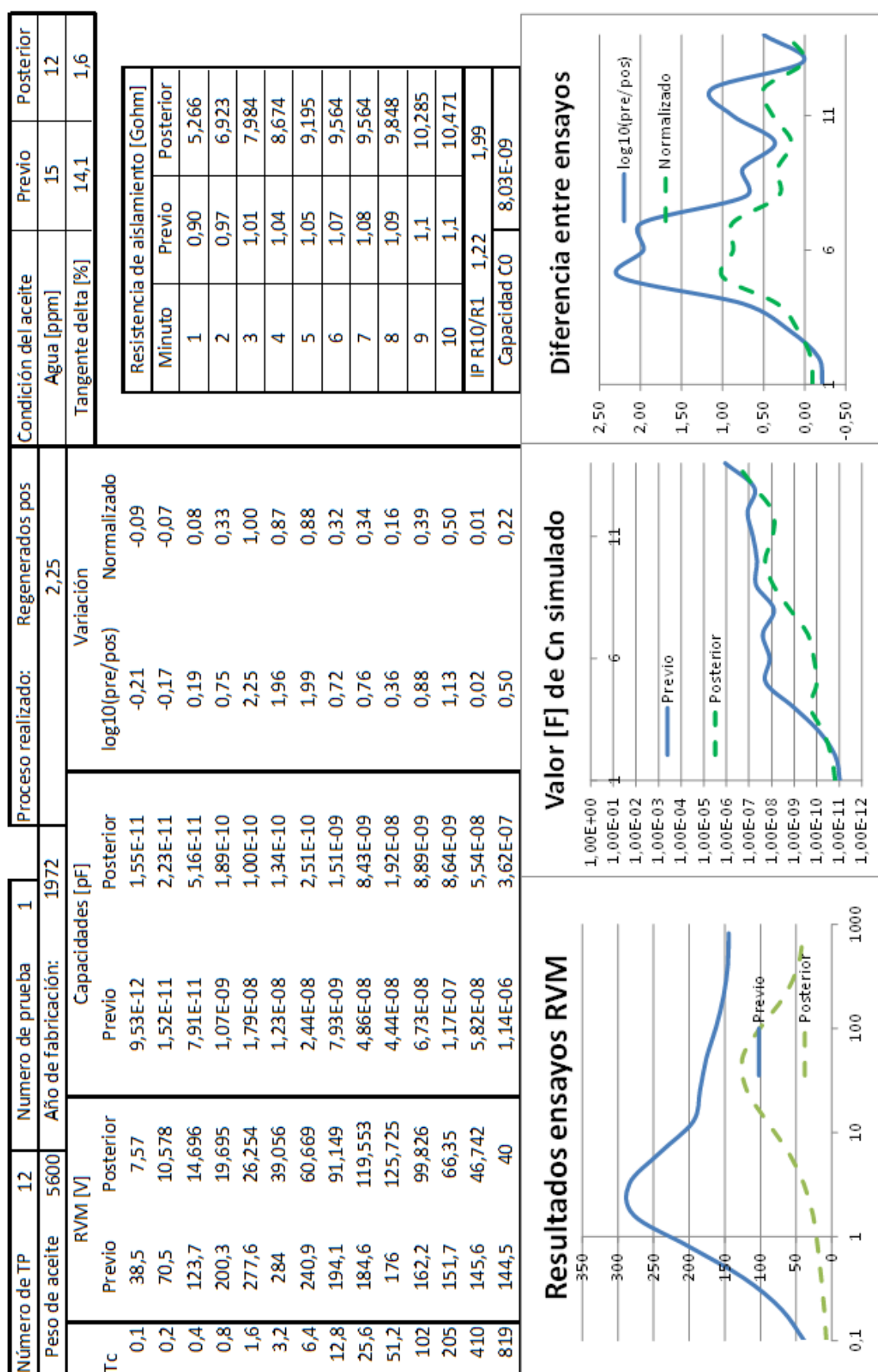


Figura 156 Cuadro resumen, Tp12 ensayo 1

7.4.20 Transformador 12 ensayo 2

Este segundo ensayo del transformador nº12, muestra los resultados obtenidos repitiendo los ensayos previo y posterior al tratamiento con la diferencia de que en este caso la inyección de tensión se hace por el devanado de baja tensión del transformador.

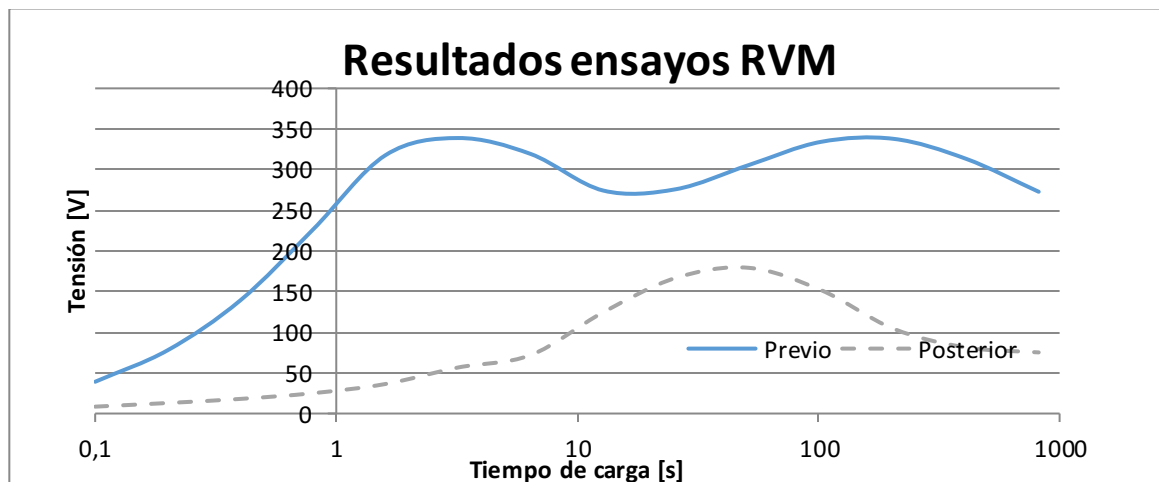


Figura 157 RVM trafo 12 prueba 2

La morfología de la curva de reabsorción obtenida tras los ensayos previo y posterior al tratamiento muestra una morfología semejante a la presentada en el caso anterior (figura 154) observándose dos máximos uno en el entorno de los 3 segundos y otro segundo sobre los 150 segundos en la curva pretratamiento, si bien en la curva posterior al tratamiento puede observarse como igualmente tenemos un único máximo en el entorno de los 40 segundos, lo que no coincide con el segundo máximo de la curva previa como ocurría en el caso anterior.

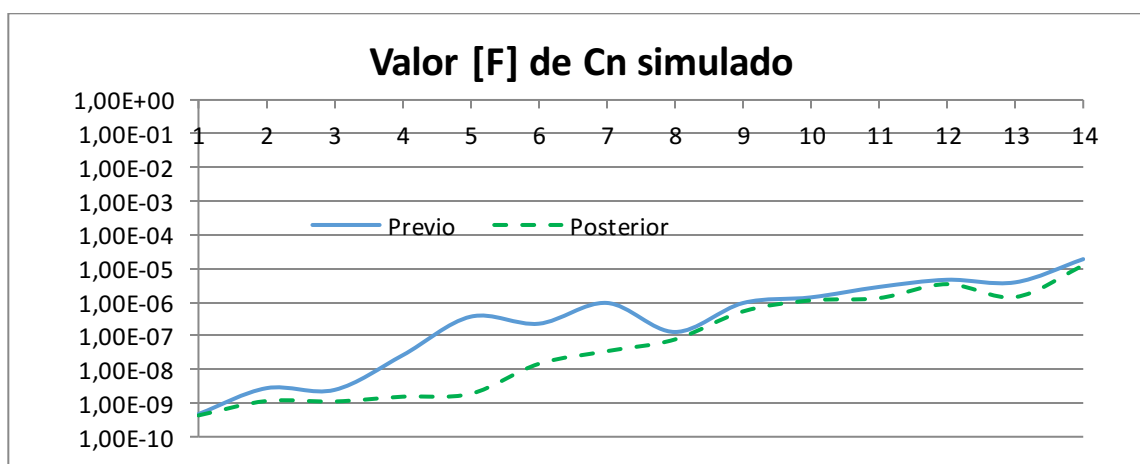


Figura 158 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

En el caso de la evaluación de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente de Debye, puede ser observado como el comportamiento es semejante, sin embargo la extensión del área que ha mostrado sensibilidad al tratamiento es mucho menor circunscribiéndose a las ramas entre la 4 y la 7, este fenómeno puede encontrar su explicación en el hecho de que al tratarse del devanado de baja tensión, y encontrarse este en el interior

de la parte activa pegado al núcleo, resulta más inaccesible dificultando que el tratamiento alcance esas zonas, dado que el aceite limpio ha de circular por los canales de refrigeración.

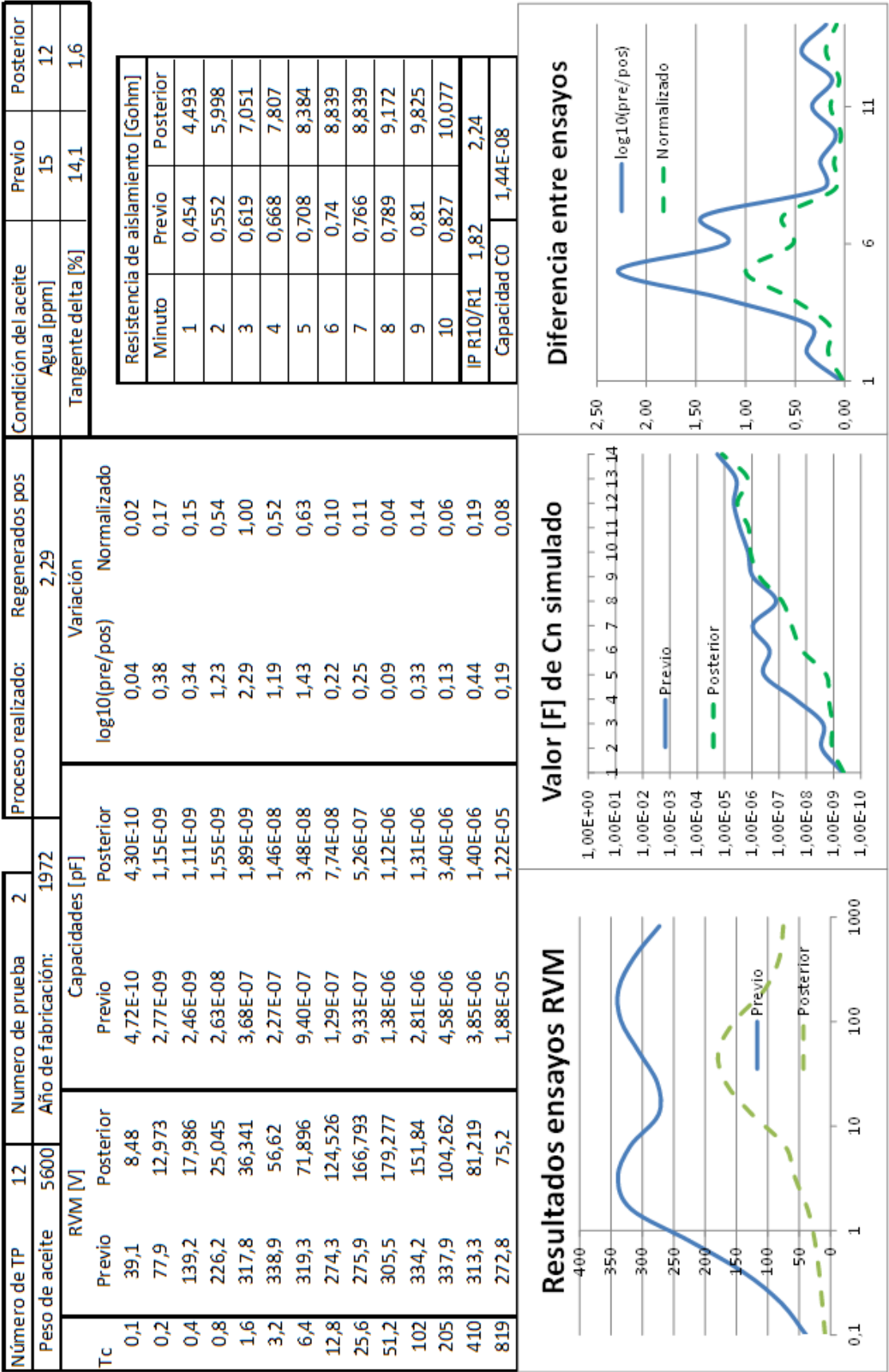


Figura 159 Cuadro resumen, Tp12 ensayo 2

7.4.21 Transformador 13 ensayo 1

El transformador presentado en este caso ha sido sometido a un reacondicionado y a una regeneración del dieléctrico, los valores fisicoquímicos obtenidos en los ensayos realizados previos y posteriores al tratamiento han sido los siguientes:

Tabla 43 Condición del aceite previo y posterior a un proceso de regeneración y reacondicionado

Condición del aceite	Previo	Posterior
Agua [ppm]	12	7
Tangente delta [%]	21	2,4

La evaluación de la representación tradicional del ensayo de RVM muestra dos curvas bien distintas, en las que en este caso es posible hacer una interpretación pormenorizada de cada una de ellas.

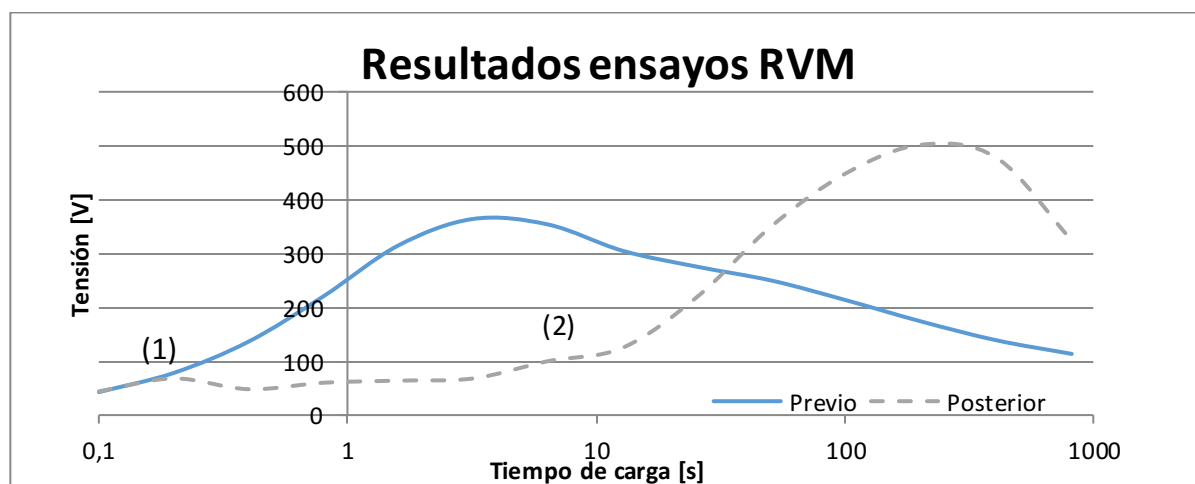


Figura 160 RVM trafo 13 prueba 1

La curva previa al tratamiento, muestra un comportamiento propio de un transformador con un dieléctrico afectado por polarización interfacial del que poca conclusión más se puede extraer dado que la contaminación interfacial no permite observar ningún otro efecto al solaparlos [51], sin embargo la curva posterior al tratamiento se muestra como una curva propia de un transformador en buena condición si bien se puede decir que en función a sus dos máximos relativos, existe humedad remanente (1) en base a la pendiente inicial y pese a la regeneración sigue existiendo un pequeño indicio de polarización interfacial (2) por lo demás la constante de tiempo es propia de un transformador en muy buena condición.

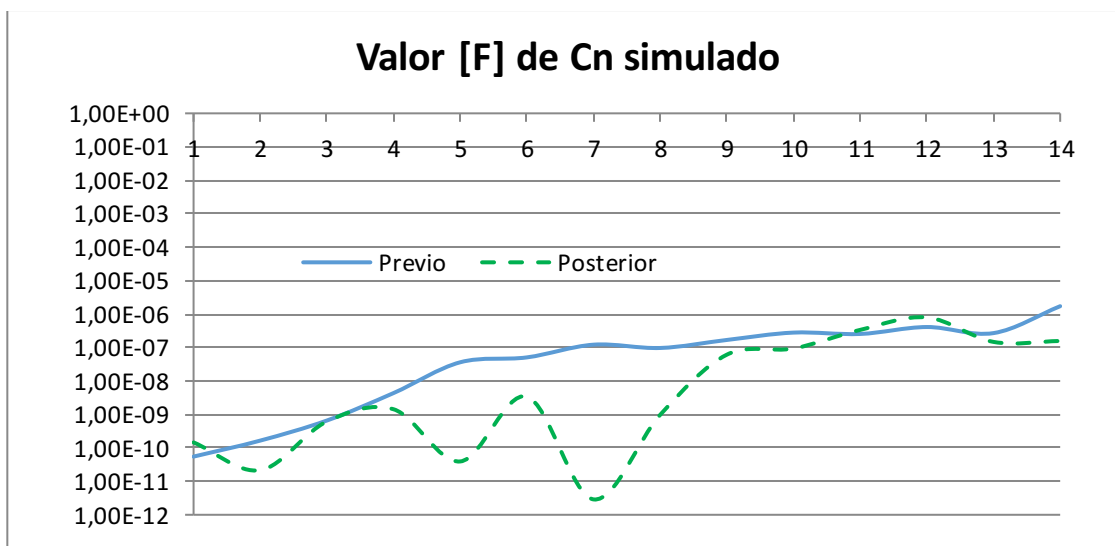


Figura 161 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

La representación de las 14 capacidades de las mismas 14 ramas del circuito equivalente de Debye muestra que hay dos zonas sensibles al tratamiento aplicado al fluido dieléctrico del transformador.

En primer lugar puede ser observado una leve disminución de la capacidad de la rama nº2 rama que ha sido identificada a lo largo de este documento como la más sensible a los tratamientos de reacondicionado aplicados al transformador, su variación no es excesiva, lo cual está en línea con lo que ha sido observado en los ensayos fisicoquímicos presentados en la tabla 43 en la que puede ser observado que la cantidad de agua remanente es de 7ppm y en la figura 160 en el que existe un máximo relativo en torno a los 0,2 segundos.

En segundo lugar, producto del tratamiento de regeneración llevado a cabo se observa que han sido sensibles al mismo las ramas entre la 4 y la 9, ramas que han venido siendo identificadas a lo largo de los casos expuestos como sensibles a los procesos de regeneración.

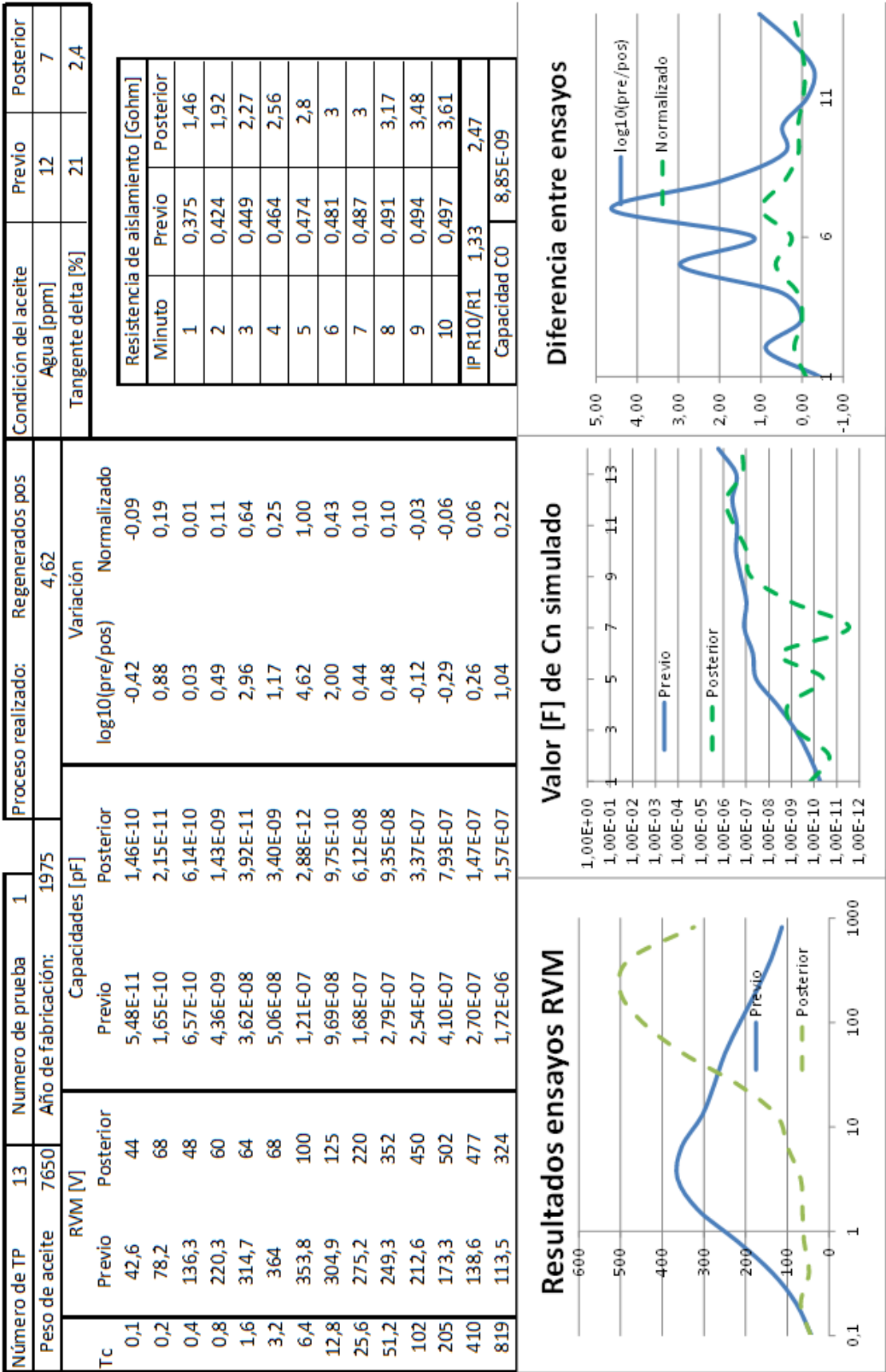


Figura 162 Cuadro resumen, Tp13 ensayo 1

7.4.22 Transformador 14 ensayo 1

El transformador presentado en este caso es un transformador al que se le ha realizado un cambio de aceite, este procedimiento es asemejable un procedimiento de regeneración, en tanto en cuanto una vez vaciado el transformador es empleado un aceite de sacrificio para rociar las superficies de la parte activa eliminando los compuestos polares y lodos depositados sobre la parte activa.

Tabla 44 Condición del aceite previo y posterior al cambio de aceite realizado.

Condición del aceite	Previo	Posterior
Agua [ppm]	8	4
Tangente delta [%]	13	0,78

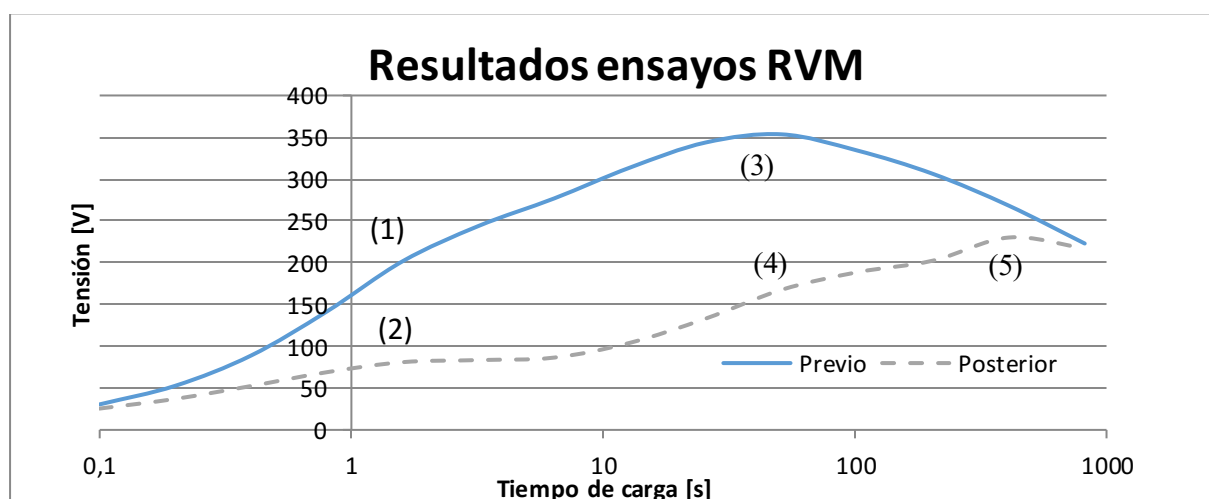


Figura 163 RVM trafo 14 prueba 1

El análisis del resultado del ensayo RVM (figura 163) permite observar determinados aspectos importantes para su análisis, la curva previa al tratamiento presenta dos máximos un primer máximo relativo (1) indicativo de polarización interfacial y un segundo máximo absoluto (3) que puede responder a la constante de tiempo de transformador, por otro lado la curva posterior al cambio de aceite muestra una curva que no es homogénea con dos máximos relativos (2) y (4) con las mismas constantes de tiempo que los citados máximos de la curva previa (1) y (3) y un máximo absoluto (5) que muestra constante de tiempo real del aislante. Haciendo una evaluación en base a la constante de tiempo como se ha hecho durante muchos años es posible indicar que la constante de tiempo del transformador progresó de unos 40 segundos a unos 400 segundos con lo que la lectura sería muy positiva respecto al tratamiento, si bien de la no uniformidad de la curva posterior al cambio de aceite ha de ser realizada una lectura crítica, dado que pese a limpieza que se ha realizado aún perduran restos del aceite original y de los compuestos polares en la interface papel aceite. Este extremo es fácilmente explicable, dado que aun cuando se cambia el aceite un porcentaje del aceite de impregnación prosigue en las bobinas y de los compuestos polares en las superficies de las mismas también existirá presencia, para evitar esto hubiera sido necesario trasladar el transformador a fabrica y allí una vez desencubado habría de haber sido limpiado completamente, lo cual es imposible de realizar en campo.

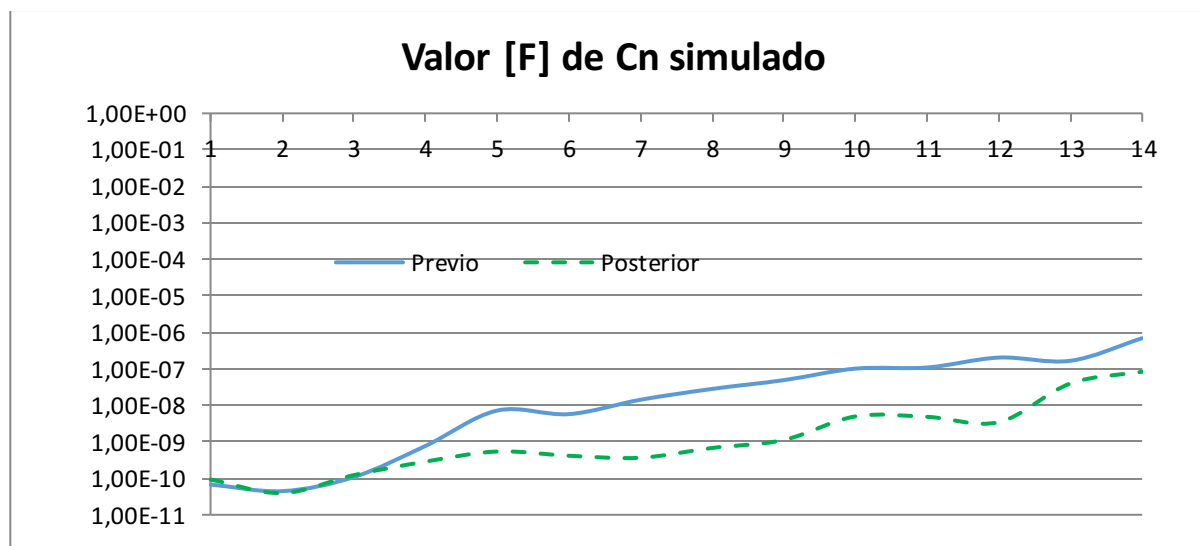


Figura 164 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

De la evaluación de la capacidad de las 14 ramas del circuito equivalente de Debye empleado, puede ser observado que las primeras tres ramas no han sido sensibles al cambio de condición, es más al cambio de aceite, si bien el transformador no mostraba un contenido elevado de agua en los análisis previos, de igual manera que el aceite introducido se encontraba deshidratado por lo que puede ser considerado que no ha existido una variación sustancial en el contenido de humedad.

Hay que resaltar que los valores de capacidad de las curvas tanto previo como posterior al cambio de aceite muestran una convexidad para la rama 5 que es la correspondiente a una constante de tiempo de 1,6 segundos, tiempo en el que existe un máximo relativo en las curvas de RVM de la figura 163 puntos (1) y (2) en dicha figura, así como en la rama 11 que es la correspondiente a la constante de tiempo 102 segundos y que a su vez coincide con el máximo relativo (4) localizado en los 100 segundos, de esto se extrae la lectura que las no homogeneidades en la curva que representan las capacidades son indicativas de que son sensibles a no uniformidades en el dieléctrico.

En cuanto al número de ramas que han mostrado sensibilidad al cambio de aceite puede ser observado que en este caso la primera rama que ha mostrado sensibilidad es la cuarta, sin embargo, la extensión de las ramas sensibles alcanza a la rama 14 de lo que se puede extraer la lectura de que el cambio de aceite es un tratamiento más profundo que el que se puede hacer mediante la regeneración.

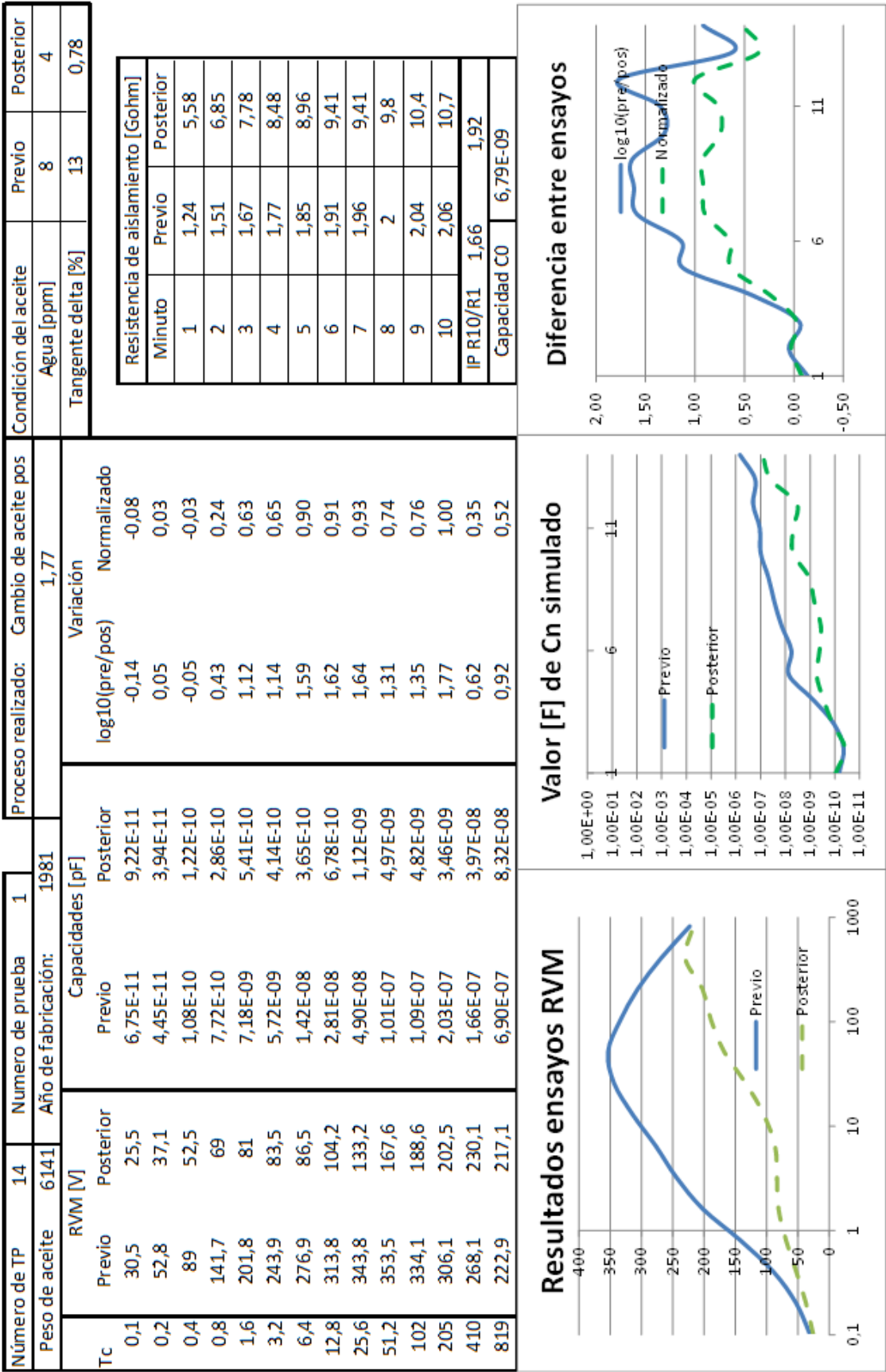


Figura 165 Cuadro resumen, Tp14 ensayo 1

7.4.23 Transformador 15 ensayo 1

El caso que se presenta en este epígrafe es semejante en cierto modo al caso presentado en el epígrafe anterior, si bien está mucho más marcado al presentar este un factor de pérdidas dieléctricas o tangente de delta de un 96% en los análisis realizados previos al tratamiento como se aprecia en la siguiente tabla, este valor es completamente atípico y propio de una mala manipulación o una incompatibilidad de materiales.

Tabla 45 Condición del aceite previo y posterior al cambio de aceite realizado.

Condición del aceite	Previo	Posterior
Agua [ppm]	8	5
Tangente delta [%]	96	1,7

Es necesario mencionar que, pese al elevadísimo valor de pérdidas dieléctricas, el otro parámetro que se está correlacionando en este trabajo que es el contenido en humedad del aceite no es muy elevado, ni tampoco experimenta una variación reseñable tras el cambio de aceite.

El estudio de la representación de la RVM en función del tiempo de carga y la tensión de pico alcanzado en cada ciclo, es decir la representación tradicional, ofrece una lectura interesante:

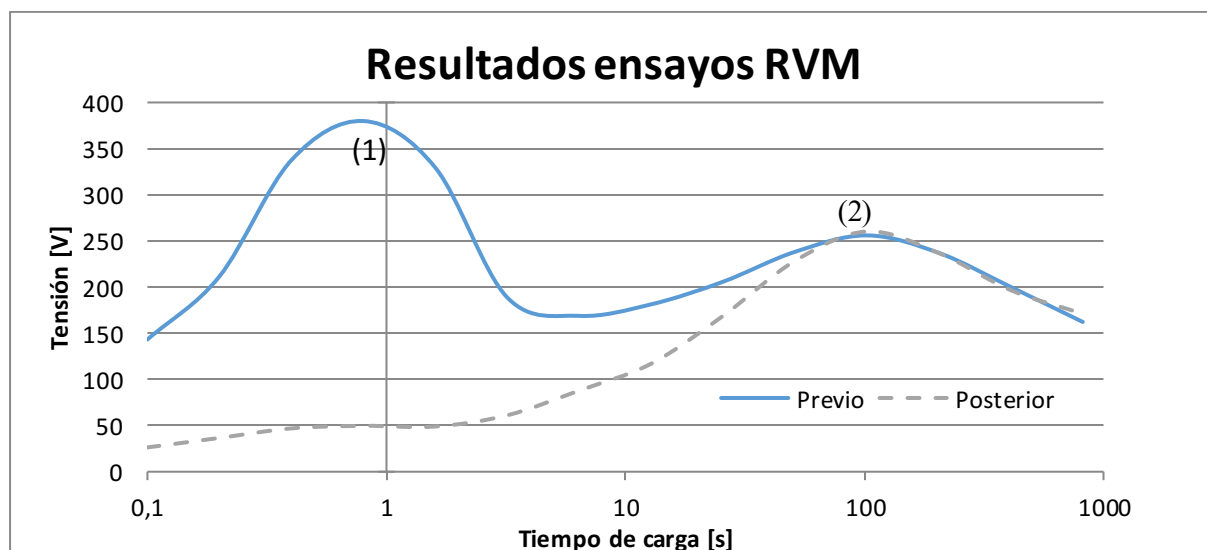


Figura 166 trafo 15 prueba 1

En este caso el ensayo previo muestra un resultado en el que se observa que en el dieléctrico existe un contaminante con una presencia elevada pero que no causa polarización interfacial, siendo su acción circunscrita a los tiempos de polarización muy bajos $t < 1$ sg por lo que es aplicable lo descrito en el apartado 5.2.3.1 que el efecto de las ramas con constante de tiempo baja, no tienen influencia en los tiempos elevados, y es por eso que se puede observar cómo la curva trazada en el ensayo posterior al cambio de aceite encaja perfectamente en el tramo final de la curva previa al tratamiento (2), de lo que se desprende la lectura de que el cambio de aceite ha eliminado el compuesto contaminante y en cambio el aislamiento ha continuado manteniendo su condición.

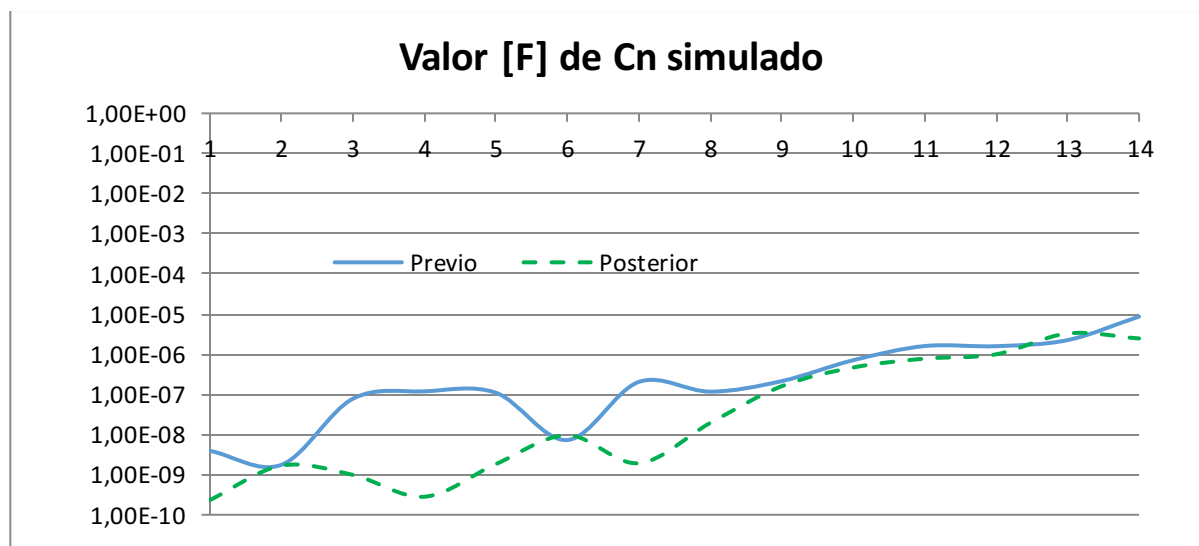


Figura 167 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

La lectura de la representación de la capacidad de cada una de las catorce ramas de polarización del circuito equivalente de Debye representadas en la (figura 167), permite observar cómo hay dos conjuntos de ramas que han sido sensibles al cambio de condición en el dieléctrico del transformador, un primer grupo que comprende las ramas de la 3 a la 5 y un segundo grupo que comprendería a las ramas 7 y 8.

Resulta reseñable la rama 2 la cual ha venido siendo identificada con el contenido de humedad que no ha experimentado variaciones reseñables, así como las ramas comprendidas entre la 9 y la 14 que de igual forma a lo observado en la representación tradicional en la que confluían las gráficas previa y posterior a partir de un tiempo de carga de 100 segundos, en este caso confluyen o son similares las ramas a partir de la constante de tiempo de 25,6 segundos, esto permite extraer la lectura de que: en la representación tradicional el efecto de solapamiento del efecto de una rama con una constante de tiempo de 0,8 segundos (la que provoca el máximo denominado como (1) en la figura 166) se extiende hasta casi los 100 segundos. Esto viene a soportar la hipótesis de que el empleo de un circuito equivalente de Debye permite aislar con mayor precisión la influencia de los distintos compuestos polares.

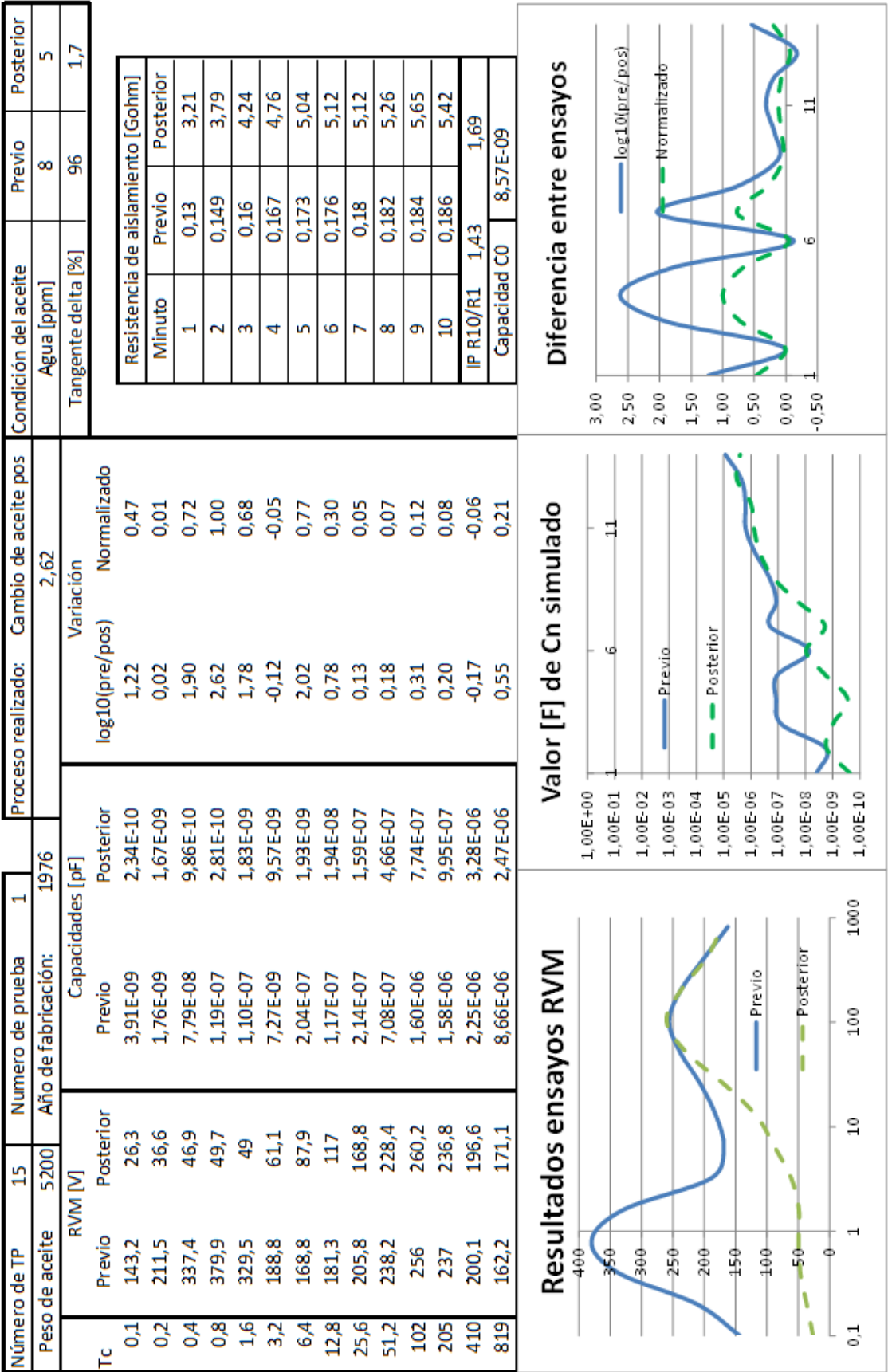


Figura 168 Cuadro resumen, Tp15 ensayo 1

7.4.24 Transformador 16 ensayo 1

El transformador presentado en este caso ha sido sometido a un tratamiento de regeneración, como puede ser observado en los parámetros fisicoquímicos presentados, el contenido de humedad apenas ha variado, y en todo caso ha aumentado ligeramente, bien producto de las diferentes tomas de muestra, bien producto de que se ha absorbido cierta cantidad de humedad de las tierras de Fuller empleadas durante la regeneración del aceite.

Tabla 46 Condición del aceite previo y posterior al tratamiento de regeneración realizado.

Condición del aceite	Previo	Posterior
Agua [ppm]	10	12
Tangente delta [%]	13	1,2

El análisis de la representación tradicional de los resultados del ensayo RVM muestran la evolución desde una curva previa al tratamiento con un máximo en tiempos centrales y que muestra síntomas de estar muy influenciada por los efectos de la polarización interfacial a una curva posterior al tratamiento que se muestra limpia, propia de un transformador en buen estado con una constante de tiempo excelente, si se tiene en cuenta la antigüedad del transformador (38 años).

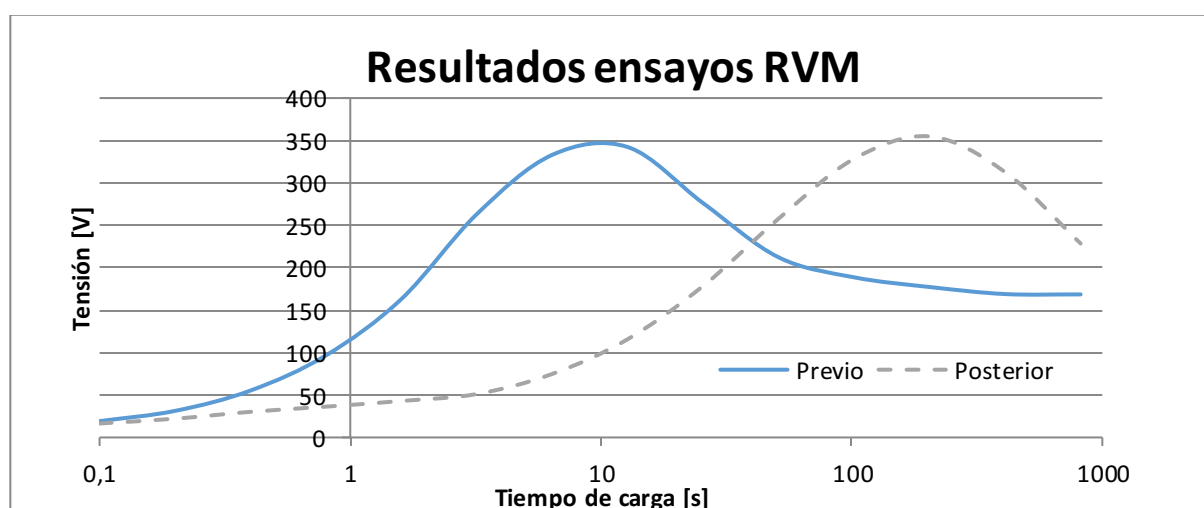


Figura 169 RVM trafo 16 prueba 1

De la representación de las capacidades de las distintas ramas del circuito equivalente de Debye en la siguiente figura (figura 170), podemos observar que las primeras cuatro ramas no ofrecen variaciones reseñables de capacidad siendo las ramas entre la 6 y la 11 las que han mostrado sensibilidad al tratamiento de regeneración llevado a cabo en el transformador.

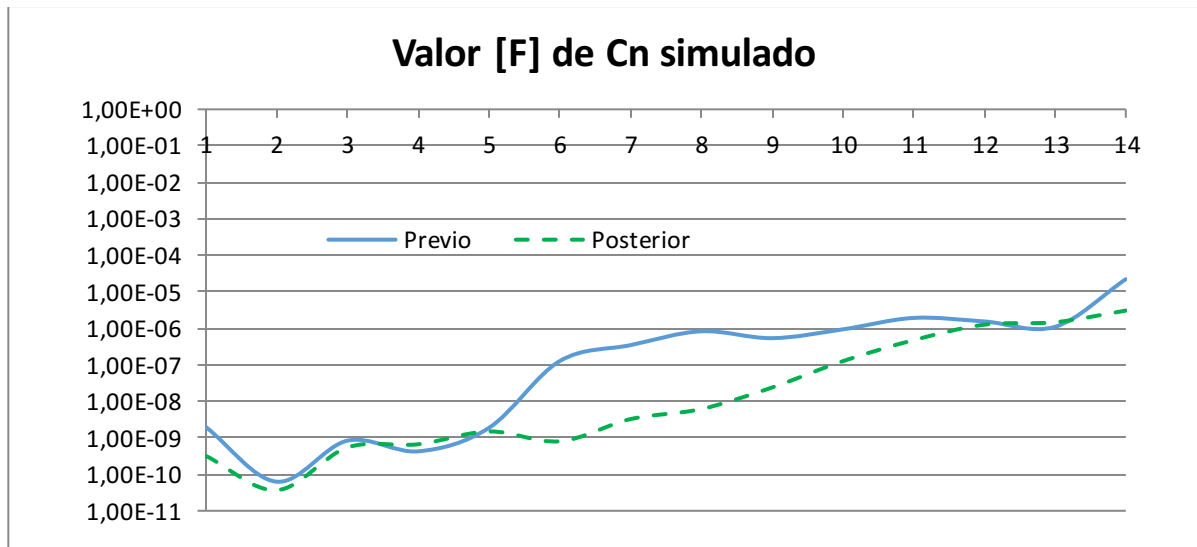


Figura 170 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

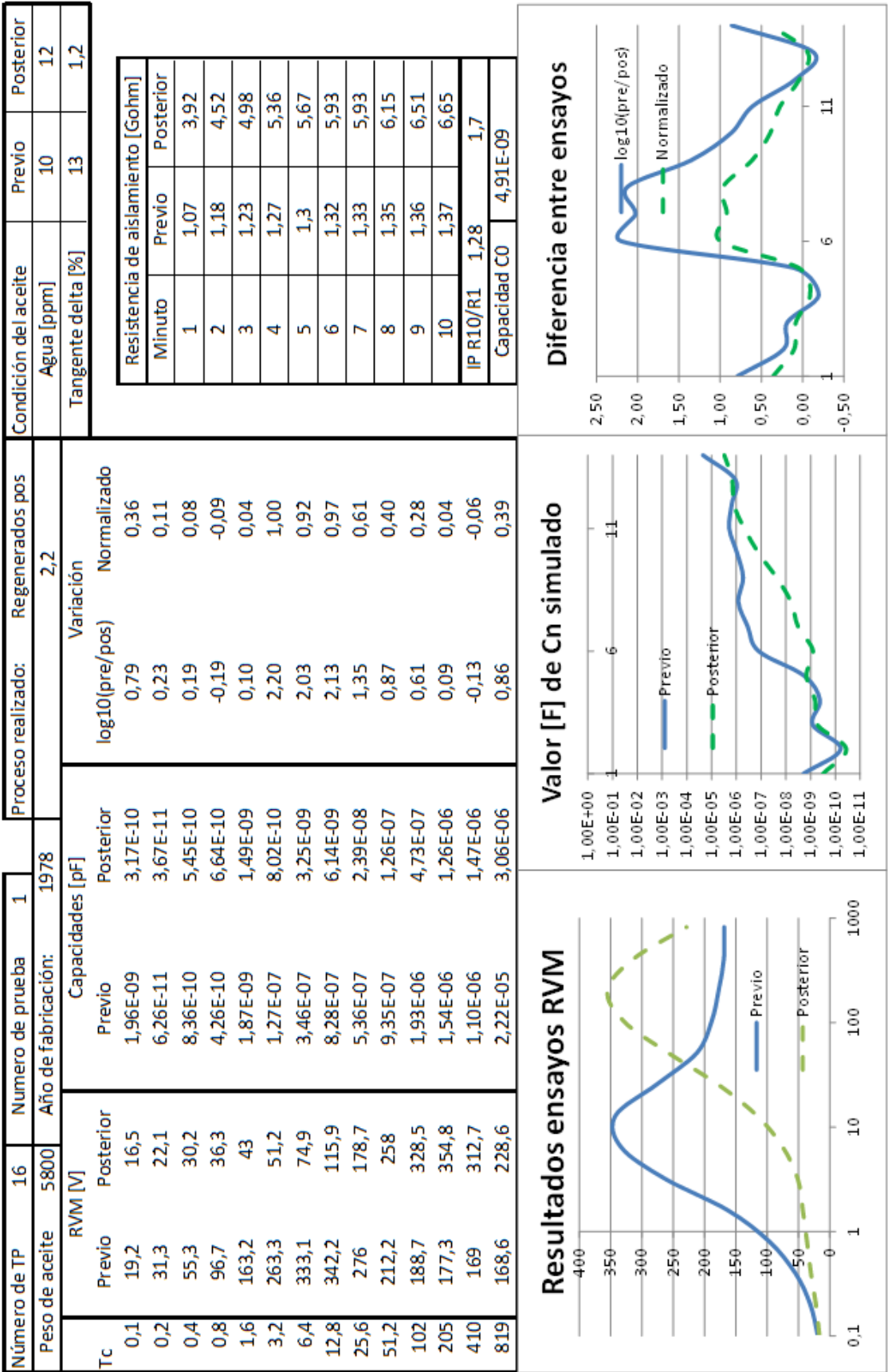


Figura 171 Cuadro resumen, Tp2 ensayo 2

7.4.25 Transformador 16 ensayo 2

En este caso como en otros casos presentados con anterioridad, se ha realizado el ensayo invirtiendo la polaridad del equipo de tal forma que se inyecta tensión en el devanado de baja tensión del transformador y se referencia a tierra el devanado de alta tensión, en este caso el condensador equivalente es el formado por $C_b + C_{ab}$.

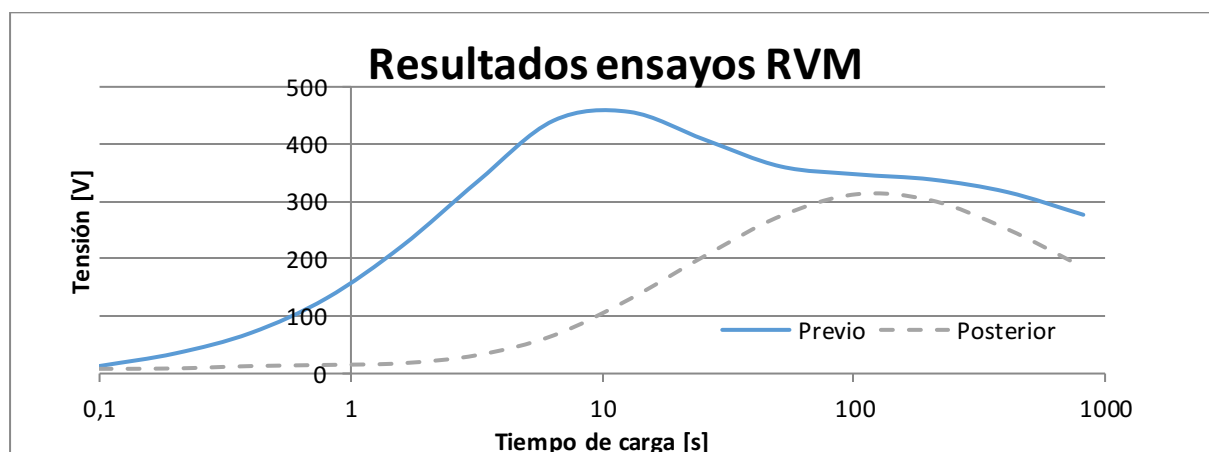


Figura 172 RBM trafo 16 prueba 2

El ensayo de RVM representado de acuerdo con el sistema tradicional muestra una morfología semejante al de la Figura 169, con la única salvedad de que el máximo absoluto en torno a los 10 segundos es más marcado si cabe que cuando se realizó el ensayo inyectando por el lado de alta tensión.

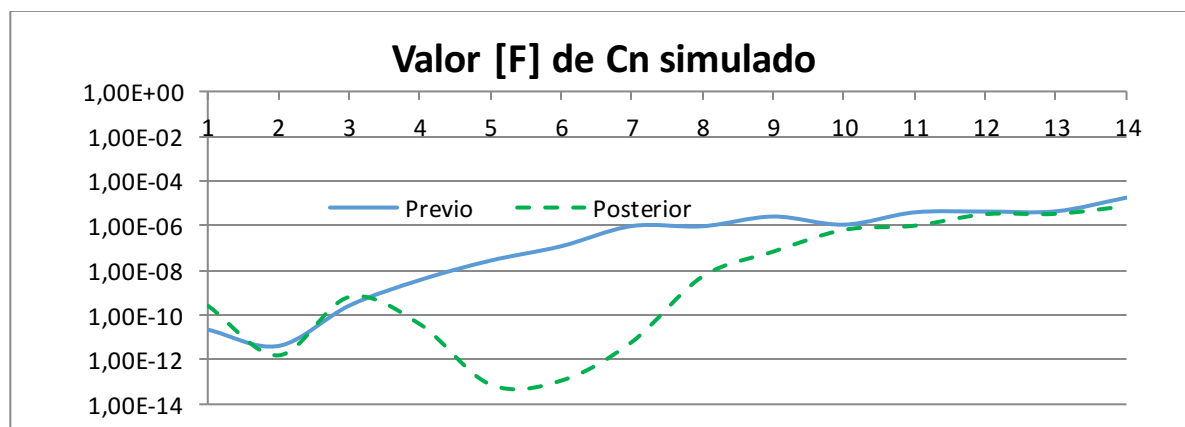


Figura 173 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

De la representación de las capacidades de las distintas ramas del circuito equivalente de Debye se extraen conclusiones semejantes a las extraídas y descritas en el apartado anterior donde se evaluaba el test realizado inyectando por alta tensión, las tres primeras ramas asociadas a la humedad permanecen constantes al tiempo que las ramas entre la 4 y la 9 asociadas a los compuestos polares disueltos en el aceite y a la polarización interfacial muestran un importante descenso producto del proceso de eliminación de compuestos polares que ha sido llevado a cabo.

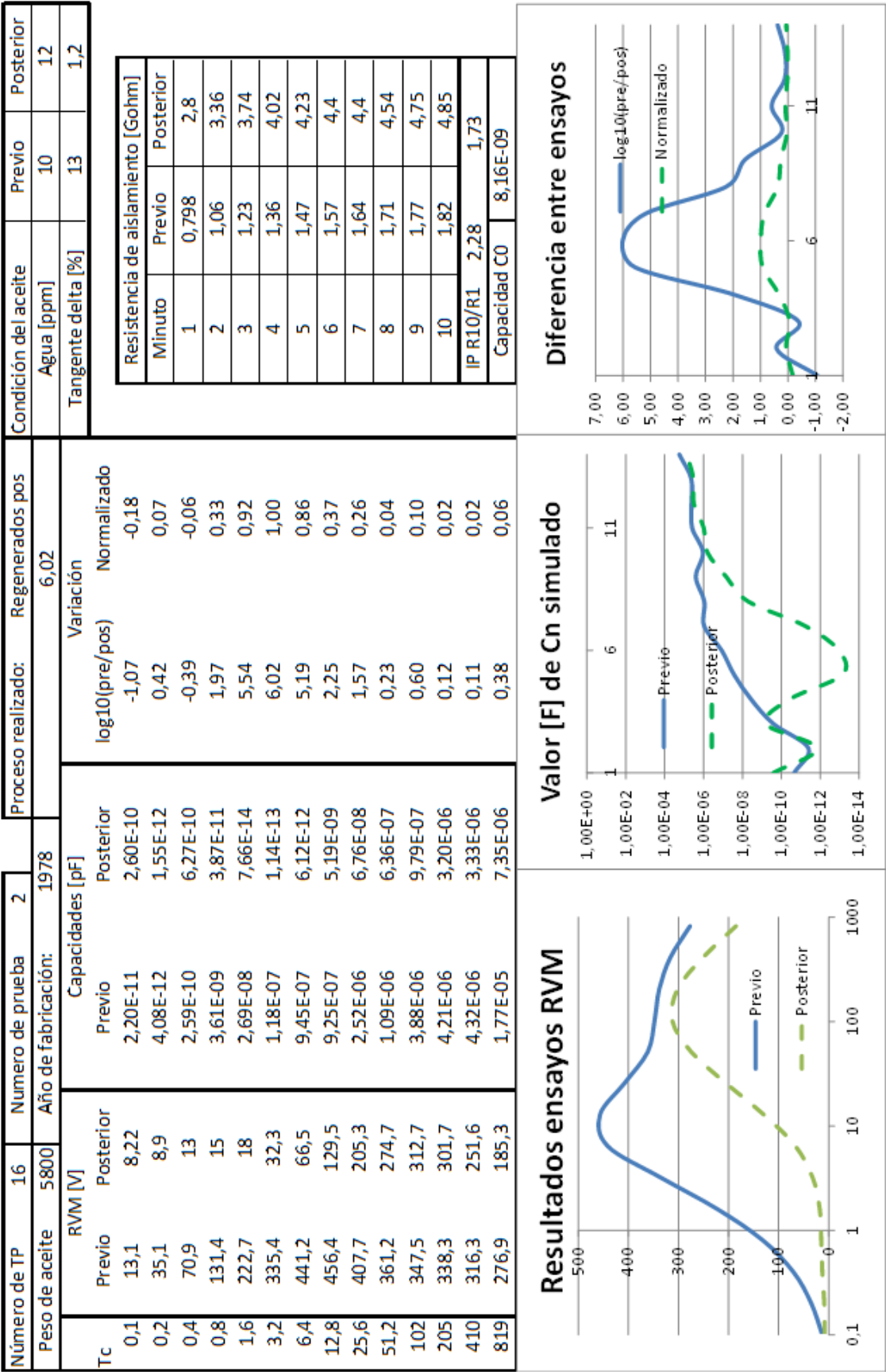


Figura 174 Cuadro resumen, Tp16 ensayo 2

7.4.26 Transformador 17 ensayo 1

En este caso no ha sido realizado ningún tratamiento, la experiencia a analizar corresponde a un proceso de envejecimiento que ha sufrido un transformador a lo largo de 8 años tras haber sido regenerado.

Tabla 47 Valores obtenidos tras la regeneración y transcurridos 8 años.

Condición del aceite	Previo <i>T=0</i>	Posterior <i>T=8 años</i>
Agua [ppm]	9	13
Tangente delta [%]	1,2	11

Dada la antigüedad del transformador 42 años se puede considerar como muy exitoso el tratamiento realizado en su momento, manteniendo los valores de pérdidas dieléctricas con crecimiento de 1% anual a lo largo de los siguientes ocho años, el escaso repunte del contenido en agua sugiere que el transformador no está sufriendo hidrólisis y que el aumento del factor de pérdidas estaría más relacionado con la formación de lodos.

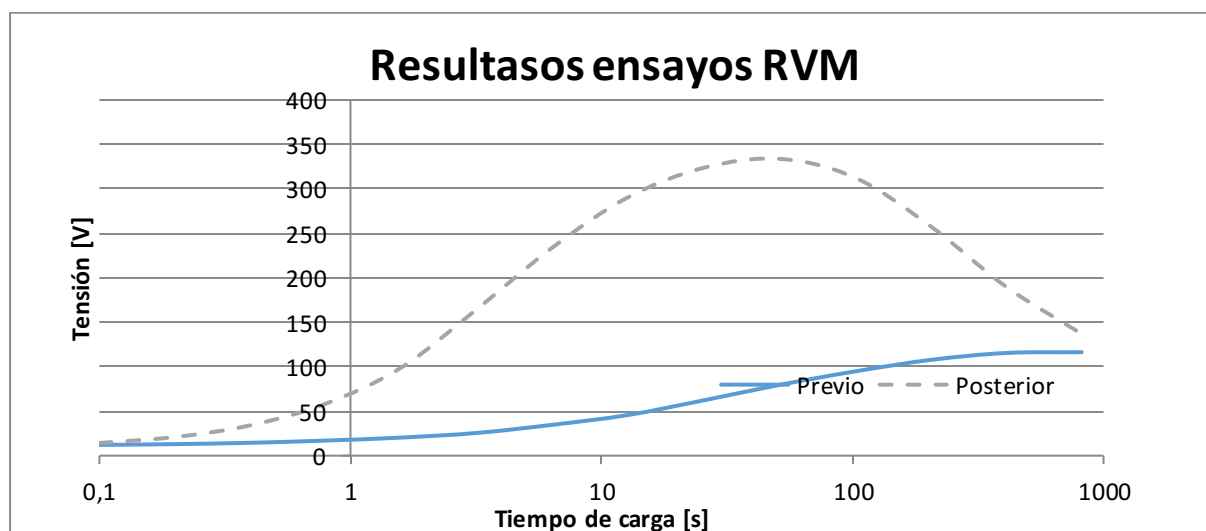


Figura 175 RVM trafo 17 prueba 1

El ensayo tradicional muestra una evolución desde un transformador con muy buena constante de tiempo para su edad a un transformador con una constante en tiempos medios muy influenciada por las altas pérdidas dieléctricas.

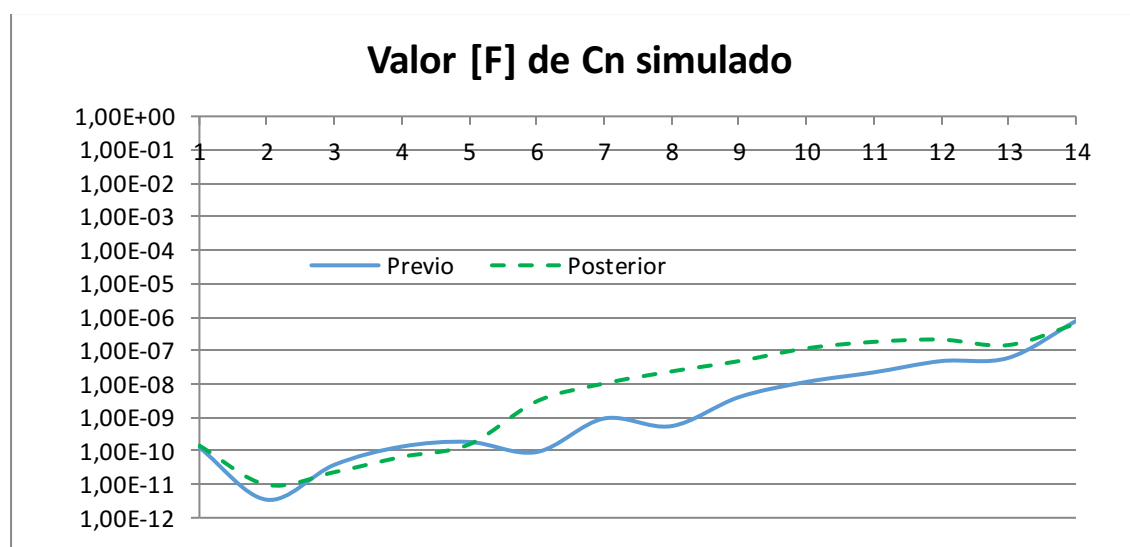


Figura 176 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

La evolución de las capacidades de las catorce ramas del circuito equivalente de Debye, permite observar como alineado con lo observado en los análisis fisicoquímicos presentados en la tabla 47 el contenido de humedad no ha variado dado que el valor de la capacidad de las primeras 5 ramas se mantiene estable con el paso del tiempo, si bien ha aumentado la capacidad de las ramas comprendidas entre la 6 y la 12, es reseñable que en esta ocasión el proceso de envejecimiento lleva asociado una variación en un sector de ramas algo más amplio que cuando se realiza una regeneración alcanzándose ramas con constantes de tiempo algo más elevadas, esto puede ser achacado a que es un proceso más profundo y que no se limita a la eliminación de compuestos de la interface si no que el envejecimiento afecta a capas más profundas del aislamiento celulósico del transformador.

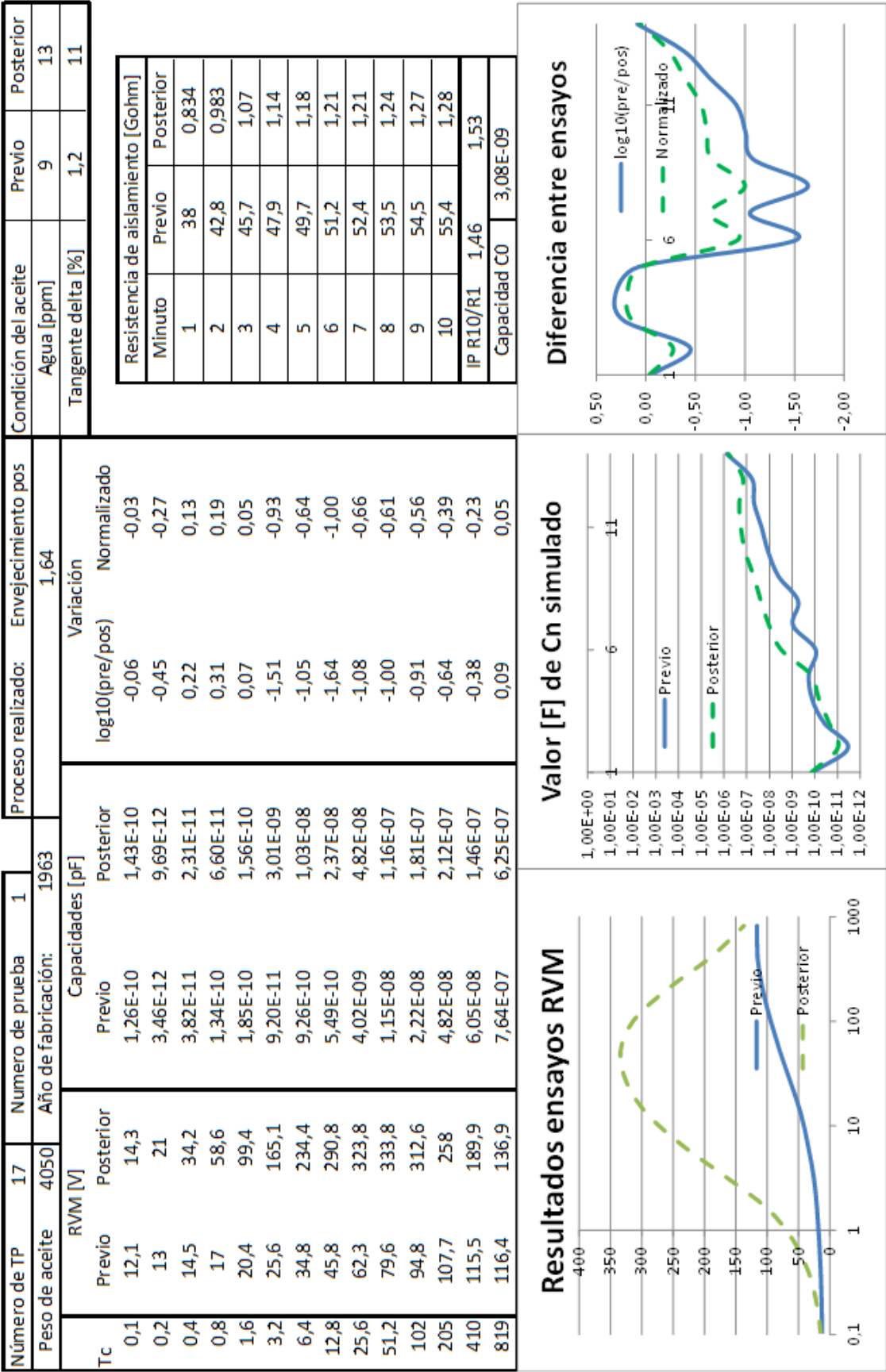


Figura 177 Cuadro resumen, Tp17 ensayo 1

7.4.27 Transformador 18 ensayo 1

El transformador de este caso ha sido sometido a un proceso de regeneración en el que se ha reducido sensiblemente su factor de pérdidas, si bien el contenido en humedad apenas ha variado o incluso se ha elevado levemente.

Tabla 48 Condición del aceite previo y posterior al tratamiento de regeneración realizado.

Condición del aceite	Previo	Posterior
Agua [ppm]	12	15
Tangente delta [%]	14,1	2,9

Como puede ser apreciado en la representación tradicional de los resultados del ensayo RVM, el transformador mostraba síntomas de una muy fuerte polarización interfacial.

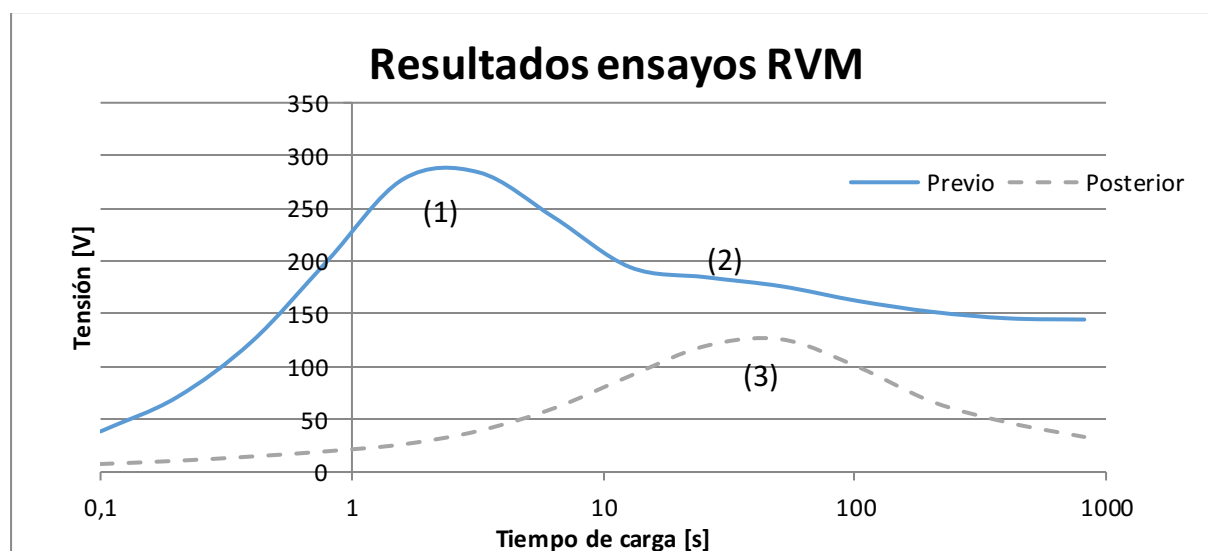


Figura 178 RVM trafo 18 prueba 1

Se aprecia una fuerte influencia de un contaminante con constante de tiempo baja (1) que no llega a solapar completamente el resto de efectos de otras ramas de polarización, de ahí que se pueda apreciar un segundo máximo, relativo en este caso, (2) el cual se corresponde con el máximo alcanzado en la curva obtenida en durante el ensayo posterior al tratamiento de regeneración (3) el cual ha eliminado los compuestos responsables de la formación del máximo absoluto de la respuesta previa al tratamiento (1)

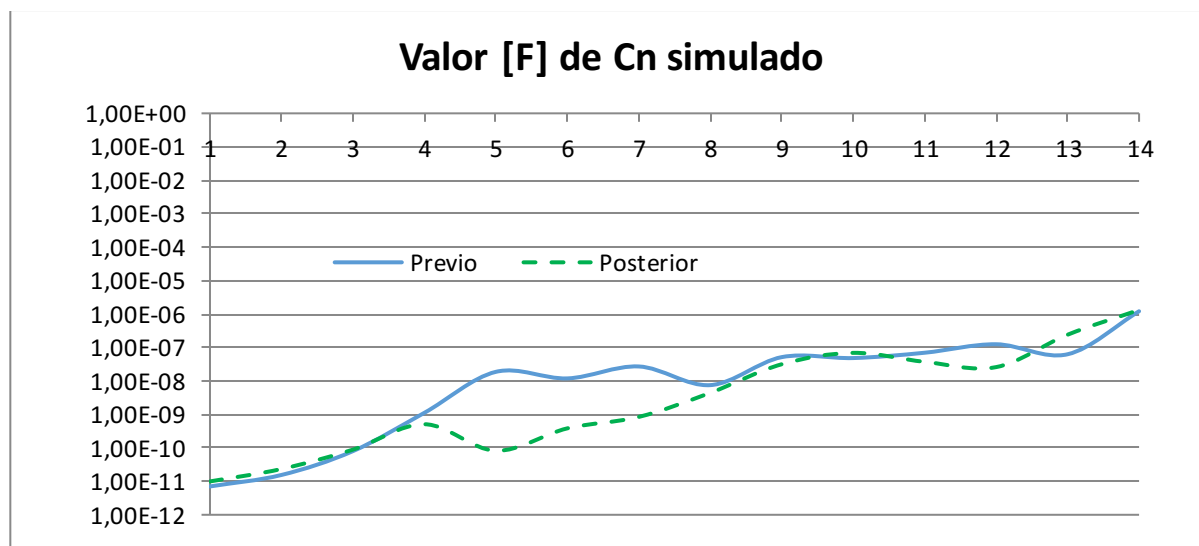


Figura 179 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

La evaluación de la evolución de la capacidad de los condensadores de cada una de las 14 ramas del circuito equivalente de Debye empleado para modelar la respuesta puede considerarse que está en línea con las observaciones realizadas anteriormente.

Las primeras cuatro ramas no han variado sustancialmente producto de que el contenido en humedad del transformador no ha cambiado, mientras que las únicas ramas que han mostrado sensibilidad a la variación en la condición del transformador son las ramas entre la 5 y la 7 lo que a su vez también concuerda con lo indicado en experiencias anteriores.

Las ramas a partir de la 8 no muestran variaciones significativas entre el ensayo previo y el posterior al tratamiento, lo que indica que los compuestos contaminantes estaban fundamentalmente disueltos en el aceite y no existía una polarización interfacial excesiva, afirmación que está alineada con lo indicado en la valoración de la respuesta representada mediante el sistema tradicional representado en la figura 178.

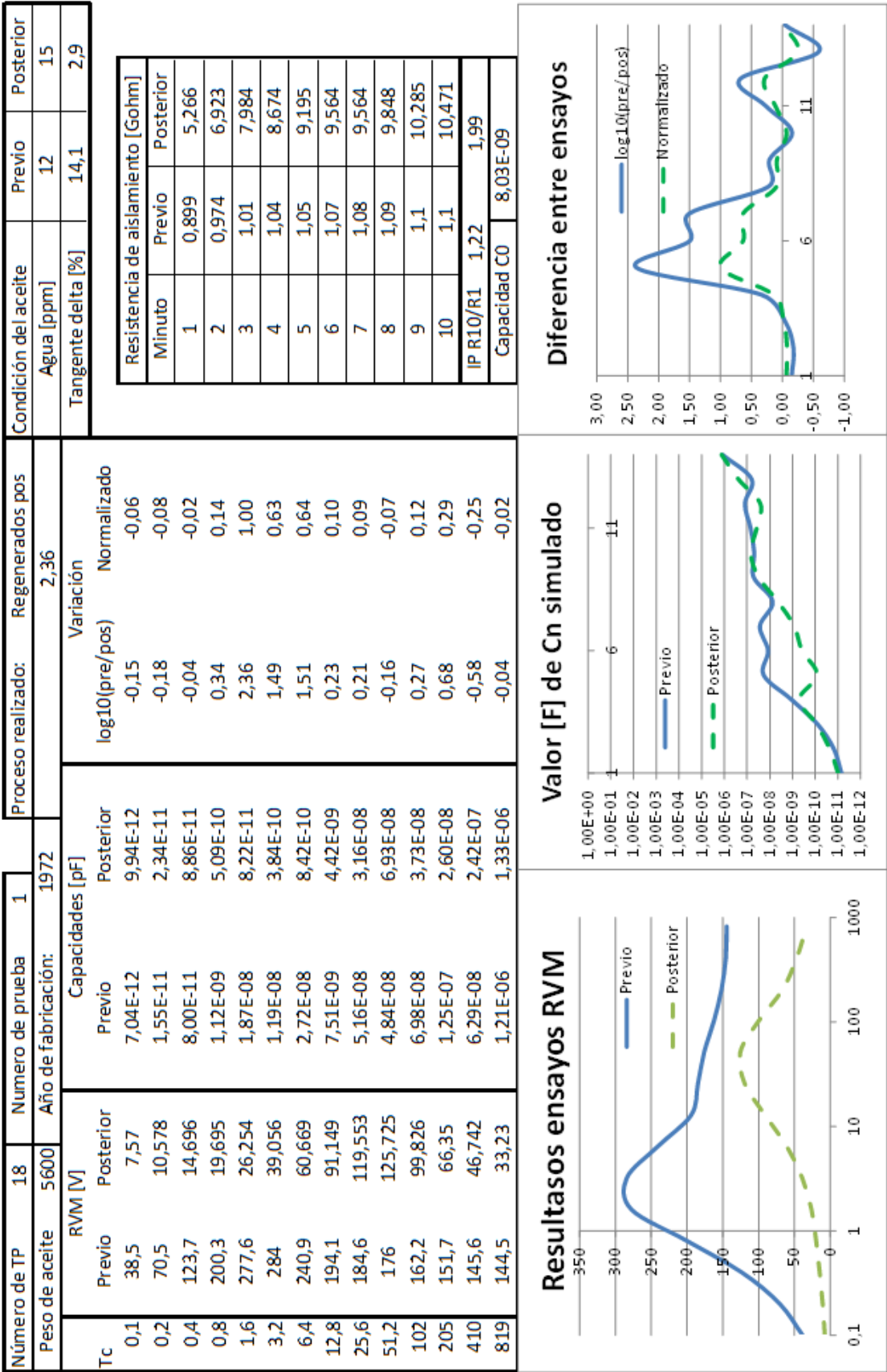


Figura 180 Cuadro resumen, Tp18 ensayo 1

7.4.28 Transformador 19 ensayo 1

El transformador presentado en este caso ha sido sometido a un tratamiento de regeneración, como se puede observar en los parámetros fisicoquímicos el contenido de humedad apenas ha variado tras la regeneración del aceite.

Tabla 49 Condición del aceite previo y posterior al tratamiento de regeneración realizado.

Condición del aceite	Previo	Posterior
Agua [ppm]	14	8
Tangente delta [%]	12	1,8

El análisis de la representación tradicional de los resultados del ensayo RVM muestra la evolución desde una curva previa al tratamiento con un máximo en tiempos centrales y que muestra síntomas de estar muy influenciada por los efectos de la polarización interfacial a una curva posterior al tratamiento que se muestra limpia, propia de un transformador en buen estado con una constante de tiempo excelente si se tiene en cuenta la antigüedad del transformador (43 años).

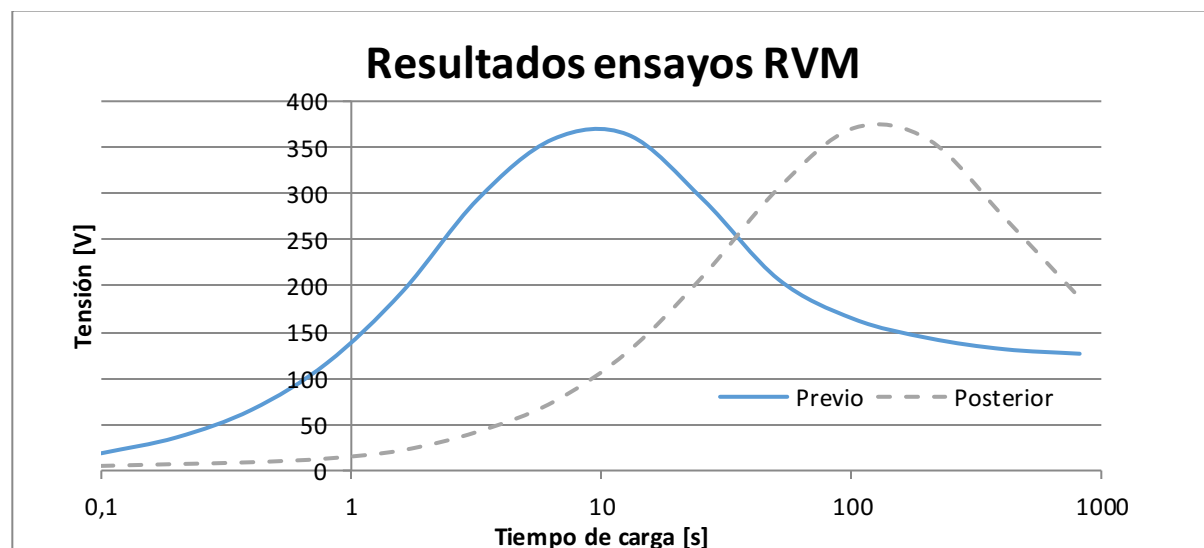


Figura 181 RVM trafo 19 prueba 1

De la representación de las capacidades de las distintas ramas del circuito equivalente de Debye en la figura 182, puede observarse que las primeras tres ramas no ofrecen variaciones reseñables de capacidad siendo las ramas entre la 4 y la 9 las que han mostrado sensibilidad al tratamiento de regeneración llevado a cabo en el transformador.

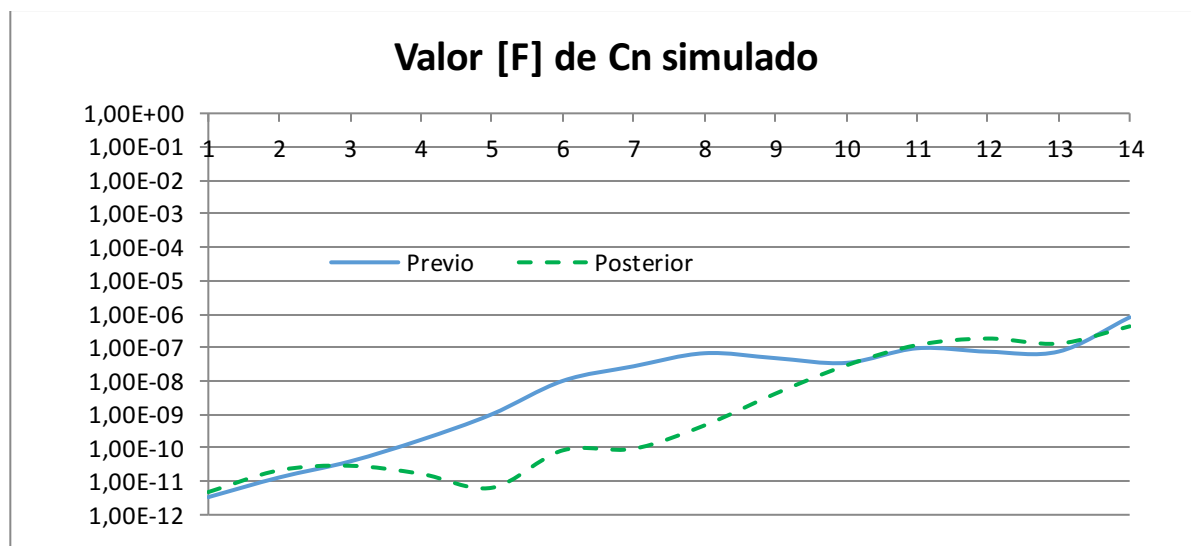


Figura 182 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

Las ramas que han mostrado sensibilidad al tratamiento de regeneración como en los casos anteriores son las de la franja central, la horquilla en la que se mueven las ramas que muestran sensibilidad en ocasiones se estrecha o se ensancha en función de los compuestos polares eliminados del aceite y los compuestos desprendidos de la interface papel aceite.

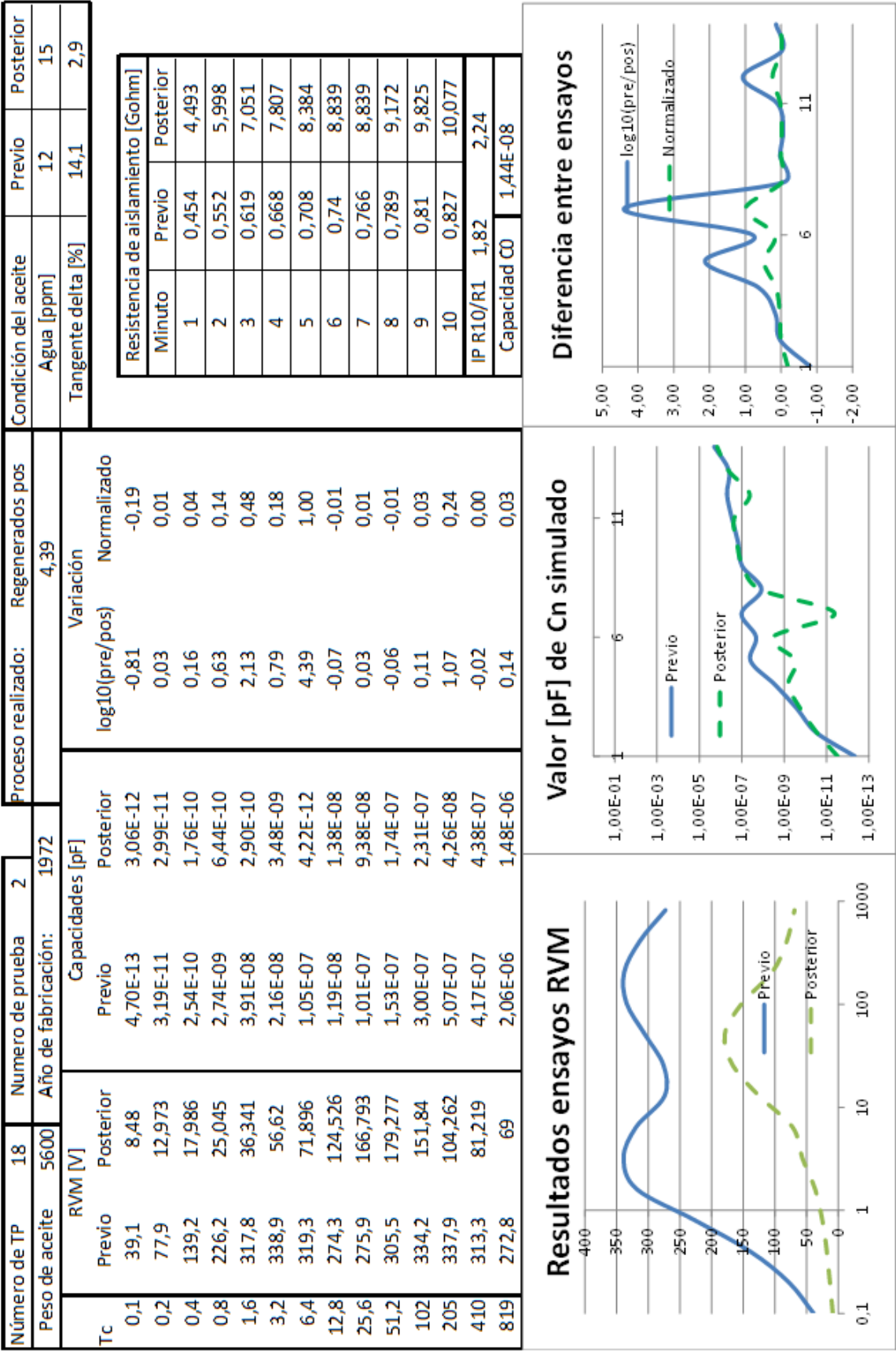


Figura 183 Cuadro resumen, Tp18 ensayo 2

7.4.29 Transformador 20 ensayo 1

El transformador presentado en este caso ha sido sometido a un tratamiento de regeneración, como se puede observar en los parámetros fisicoquímicos el contenido de humedad apenas ha variado tras la regeneración del aceite, mientras que el valor de pérdidas dieléctricas o de tangente de delta ha mejorado sustancialmente.

Tabla 50 Condición del aceite previo y posterior al tratamiento de regeneración realizado.

Condición del aceite	Previo	Posterior
Agua [ppm]	10	12
Tangente delta [%]	11,7	1,2

El análisis de la representación tradicional de los resultados del ensayo RVM muestran la evolución desde una curva previa al tratamiento con un máximo en tiempos centrales y que muestra síntomas de estar muy influenciada por los efectos de la polarización interfacial a una curva posterior al tratamiento que se muestra limpia, propia de un transformador en buen estado con una constante de tiempo buena.

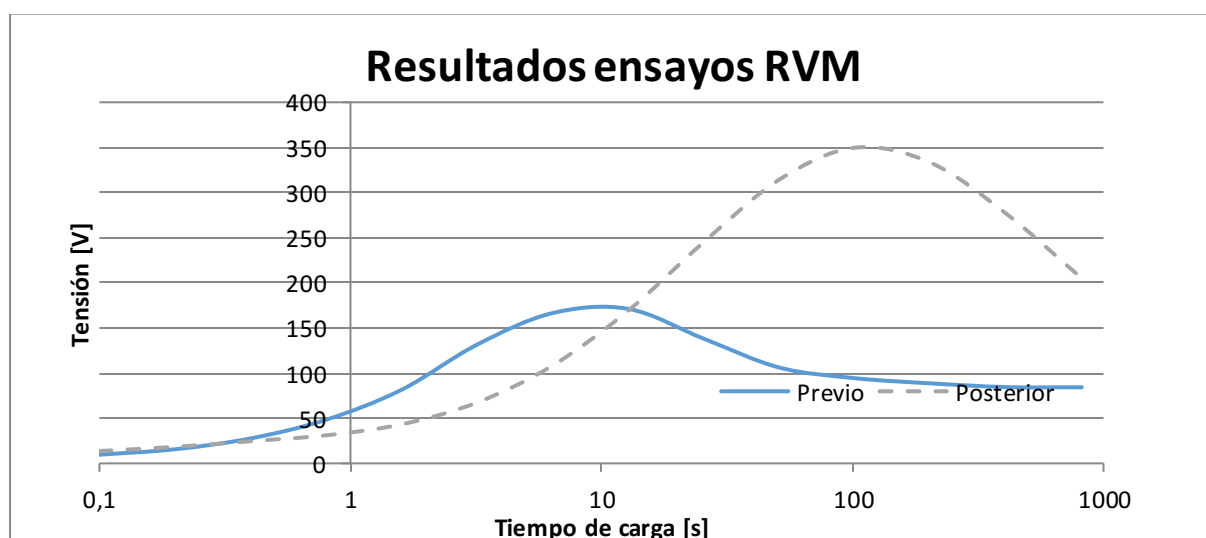


Figura 184 RVM trafo 20 prueba 1

De la representación de las capacidades de las distintas ramas del circuito equivalente de Debye en la figura 185, podemos observar que las primeras tres ramas no ofrecen variaciones reseñables de capacidad siendo las ramas entre la 6 y la 9 las que han mostrado sensibilidad al tratamiento de regeneración llevado a cabo en el transformador.

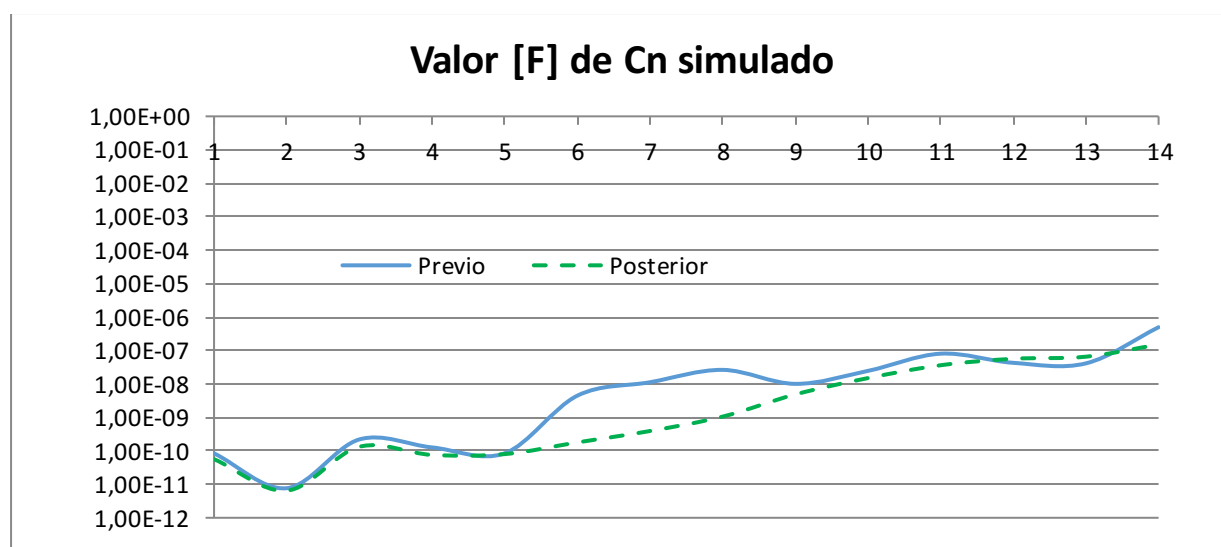


Figura 185 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente

Las ramas que han mostrado sensibilidad al tratamiento de regeneración como en los casos anteriores son las de la franja central, la horquilla en la que se mueven las ramas que muestran sensibilidad en ocasiones se estrecha o se ensancha en función de los compuestos polares eliminados del aceite y los compuestos desprendidos de la interface papel aceite.

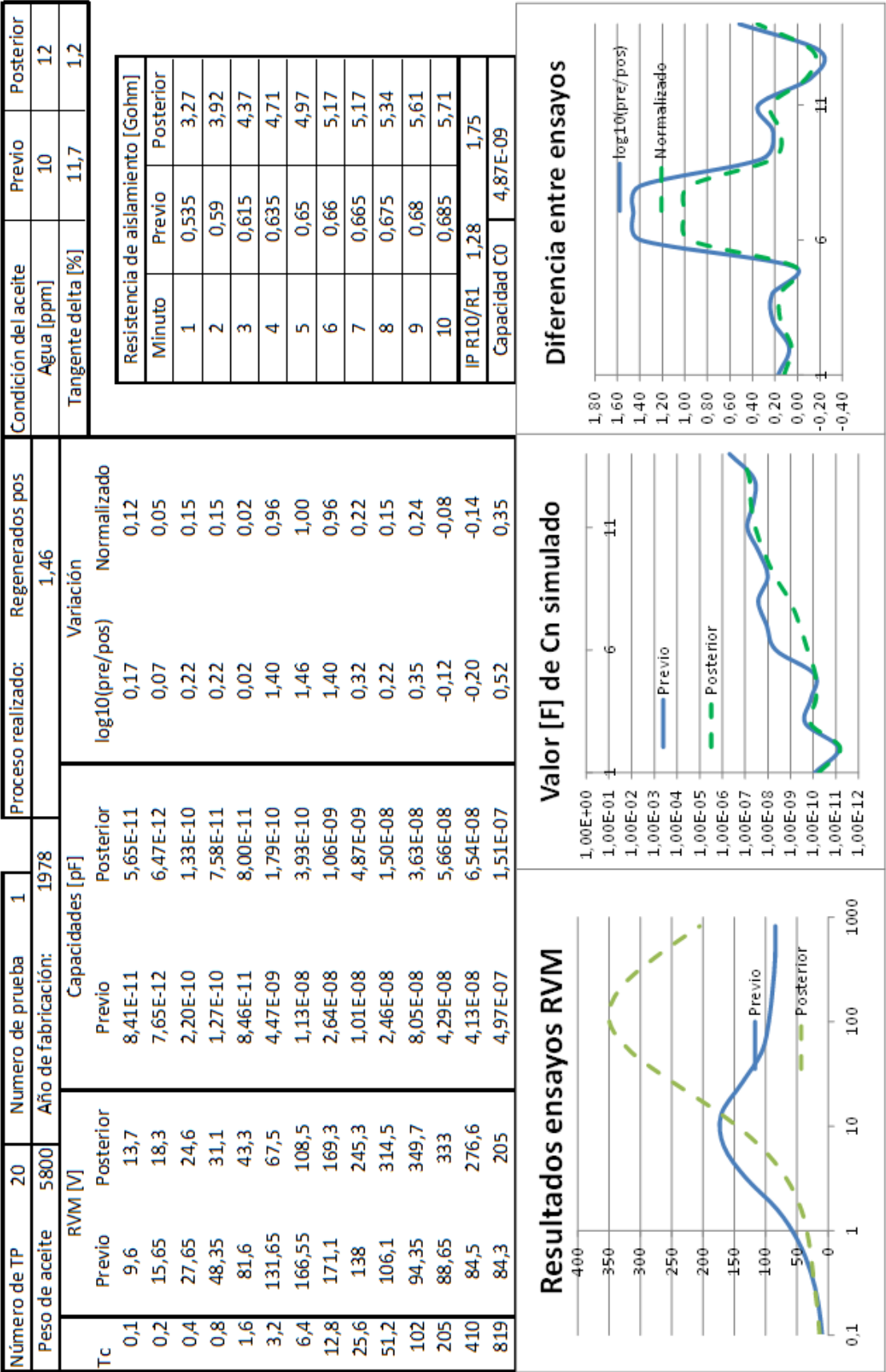


Figura 186 Cuadro resumen, Tp20 ensayo 1

7.4.30 Transformador 21 ensayo 1

El transformador presentado en esta experiencia ha sido sometido a un tratamiento de regeneración a fin de reducir su valor de pérdidas dieléctricas, los ensayos fisicoquímicos previos y posteriores al tratamiento así lo muestran:

Tabla 51 Condición del aceite previo y posterior al tratamiento de regeneración realizado.

Condición del aceite	Previo	Posterior
Agua [ppm]	11	5
Tangente delta [%]	13	1,7

Se puede apreciar adicionalmente que el contenido en humedad del aceite se ha reducido sin ser este el objetivo principal del tratamiento, se considera una buena práctica tras un proceso de regeneración realizar un pequeño reacondicionado dado que las tierras Fuller con las que se filtran los compuestos polares tienden a aportar humedad al aceite, la cual es conveniente retirar posteriormente.

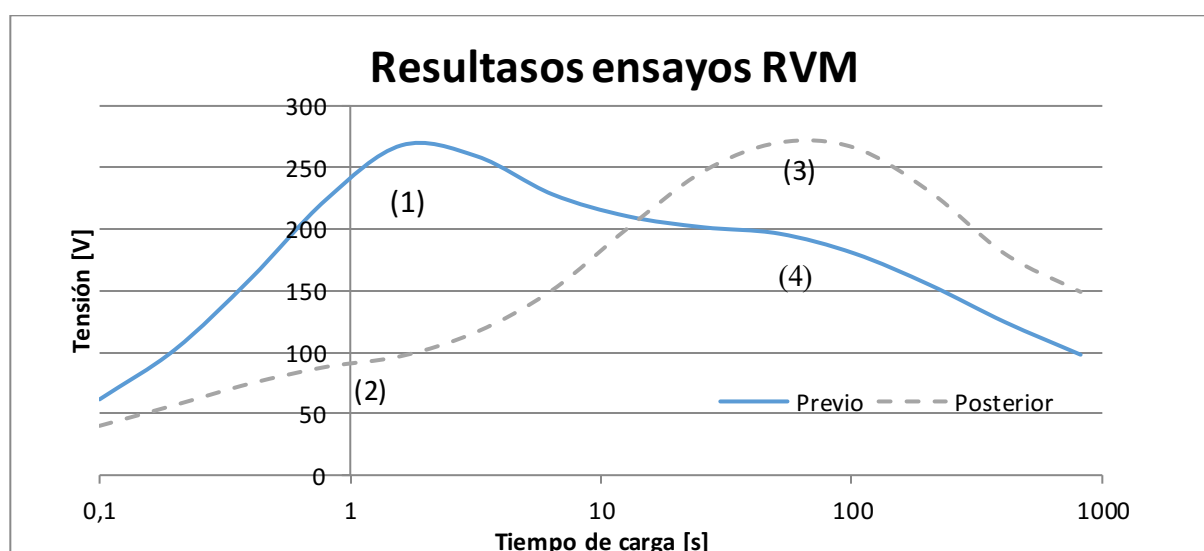


Figura 187 RVM trafo 21 prueba 1

La representación tradicional de los resultados del ensayo RVM muestra un transformador antes del tratamiento afectado por la presencia de compuestos polares disueltos en el aceite, dado que el máximo absoluto se encuentra en torno a los dos segundos (1) y no en los tiempos medios el efecto de estos compuestos no solapa toda la curva, si la afección fuera por compuestos polares en la interfaz papel aceite el máximo se encontraría en la zona media en torno a los 40 segundos. Este hecho permite observar que existe un máximo relativo (4) que posteriormente una vez realizado el tratamiento y eliminados los compuestos polares del aceite podremos comprobar cómo ese máximo relativo se corresponde con la constante de tiempo del transformador tras el tratamiento de regeneración (3), de igual manera se puede observar que en la curva representada tras el tratamiento sigue existiendo un máximo relativo (2) indicativo quizás de que no todos los compuestos polares contaminantes han sido eliminados, esto se alinea con el resultado del análisis fisicoquímico que arroja un factor de pérdidas dieléctricas tras el tratamiento de un

1,7% que es bueno pero indica que no se han podido eliminar todos los compuestos polares disueltos en el aceite.

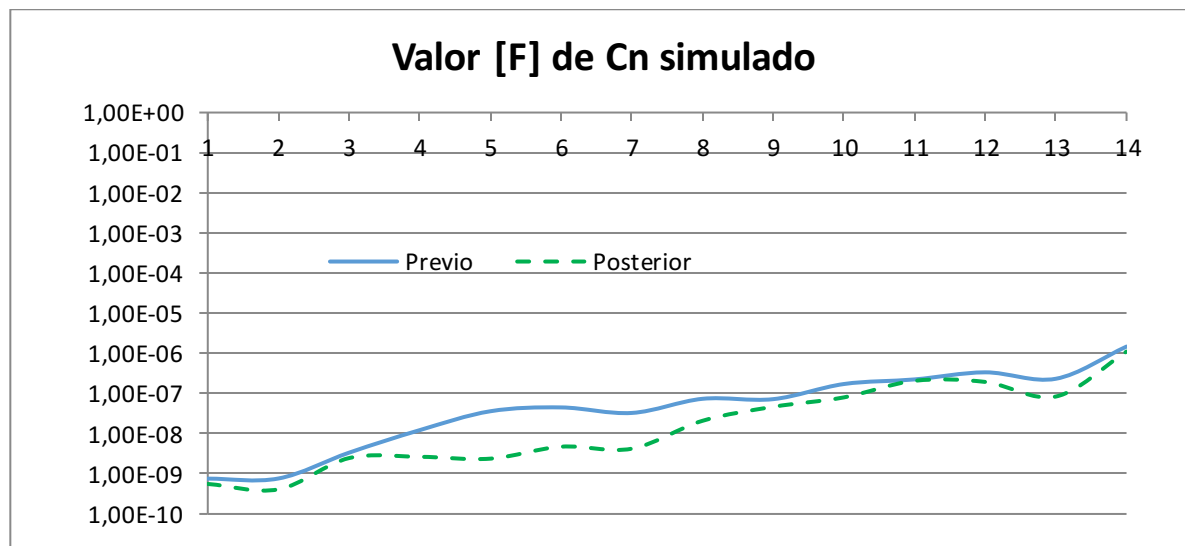


Figura 188 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente.

De la evaluación de las capacidades de las distintas ramas del circuito equivalente de Debye se puede observar que las capacidades que han experimentado variaciones significativas son las que comprende la horquilla de la 4 a la 7 por lo que no parece que el tratamiento haya arrastrado muchos compuestos polares de la interfaz papel aceite habiendo este eliminado los compuestos polares disueltos en el aceite.

Este reducido rango de ramas sensibles al tratamiento y que no se hayan mostrado sensibles ramas adyacentes, principalmente la nº8, puede ser empleado para determinar la profundidad del tratamiento, al tiempo que tiene utilidad para determinar el final de este, tomando como ejemplo este caso.

Ejemplo de utilidad:

Podría considerarse que el valor alcanzado de pérdidas dieléctricas de un 1,2%, aun es mejorable y tomar la decisión de mantener el filtro una jornada adicional en funcionamiento, si bien en base a los resultados obtenidos puede inferirse que se la mayor parte de los compuestos polares se encuentran en el interface papel aceite, si el tratamiento únicamente está basado en la circulación de aceite sin acciones encaminadas a la limpieza de las bobinas, es posible que la jornada adicional tenga como resultado, una generación de residuos (tierras Fuller) adicional, y un mayor consumo de tiempo y energía para no obtener beneficios.

Este ejemplo de hipotética toma de decisiones demuestra la utilidad de un sistema con sensibilidad para discriminar los distintos modos de contaminación de un dieléctrico, permitiendo focalizar las acciones.

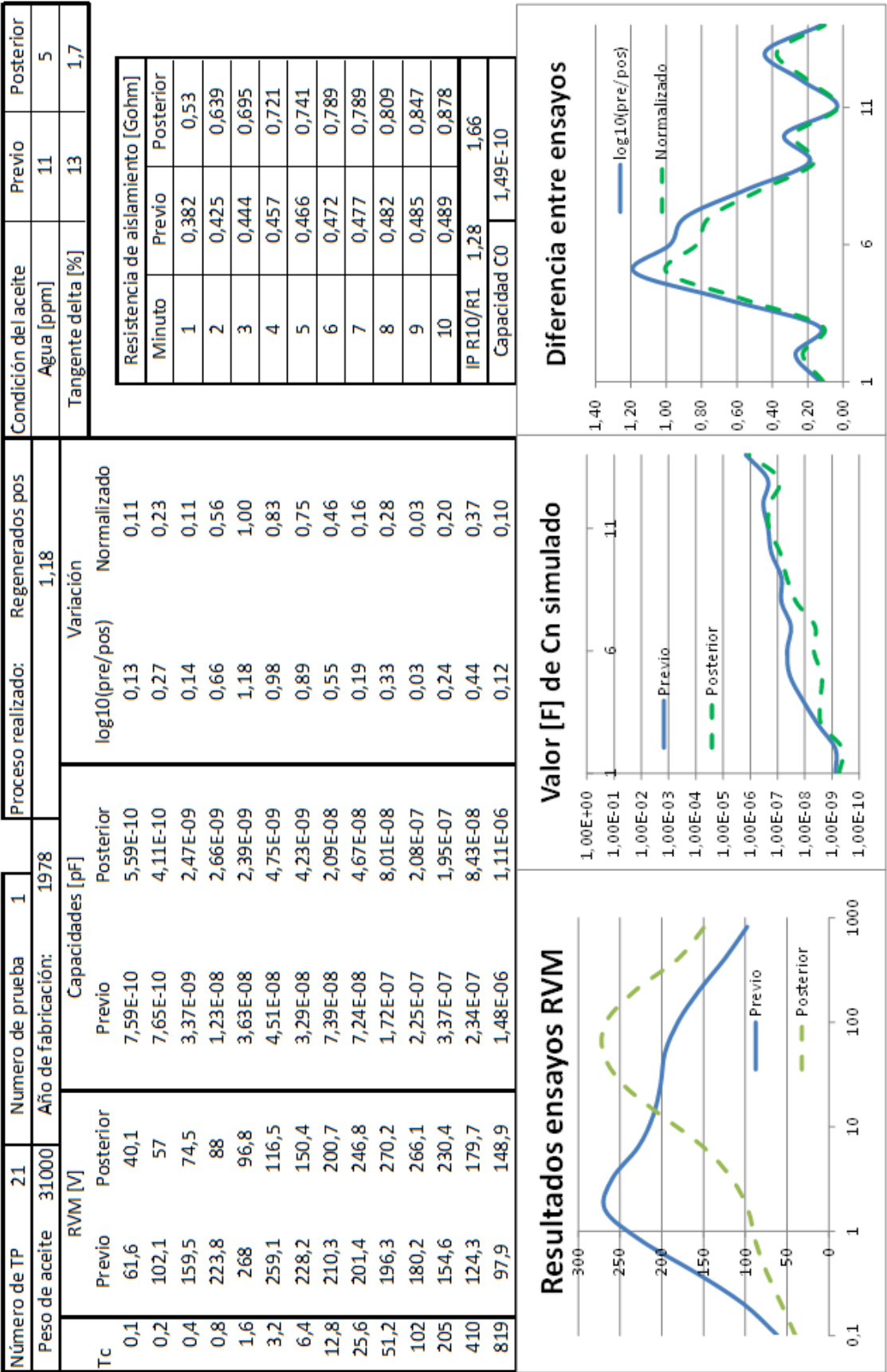


Figura 189 Cuadro resumen, Tp21 ensayo 1

7.4.31 Transformador 22 ensayo 1

El transformador presentado en este caso ha sido regenerado para reducir el factor de pérdidas dieléctricas o tangente de delta que como puede ser apreciado en los análisis era significativamente elevado.

Tabla 52 Condición del aceite previo y posterior al tratamiento de regeneración realizado.

Condición del aceite	Previo	Posterior
Agua [ppm]	18	16
Tangente delta [%]	25,4	1,7

En función de los resultados obtenidos tras el tratamiento, podemos observar que la regeneración ha sido exitosa dado que el factor de pérdidas ha disminuido mucho, si bien no se ha reacondicionado el transformador, motivo por el cual el contenido de humedad se mantiene estable, antes y después del tratamiento, todo de acuerdo con los resultados de los análisis fisicoquímicos.

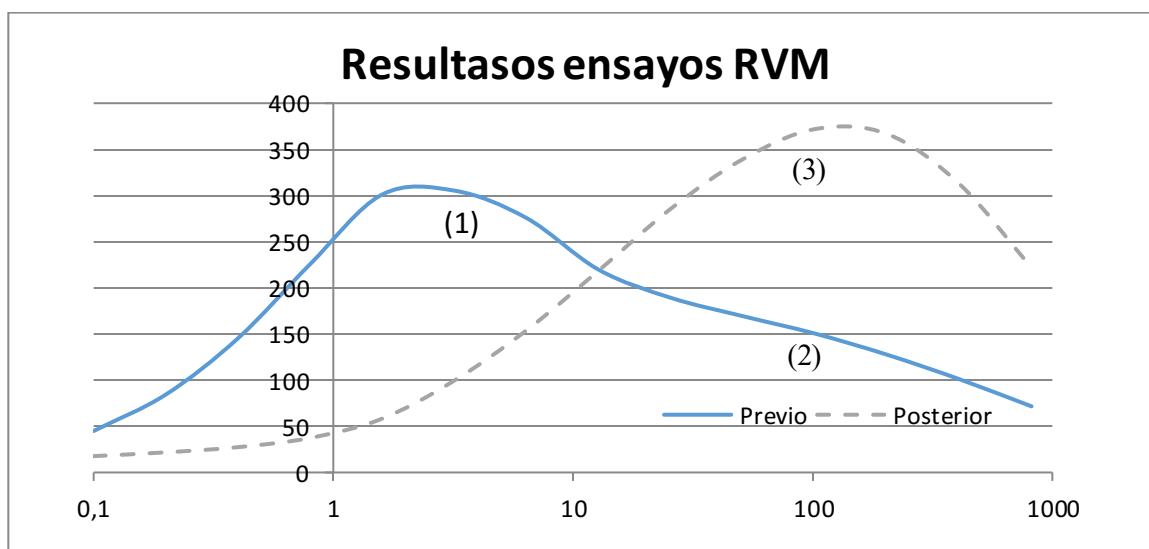


Figura 190 RVM trafo 22 prueba 1

Se aprecia una fuerte influencia de un contaminante con constante de tiempo baja (1) que no llega a solapar completamente el resto de efectos de otras ramas de polarización, de ahí que se pueda apreciar un segundo máximo, relativo en este caso, (2) el cual se corresponde con el máximo alcanzado en la curva obtenida en durante el ensayo posterior al tratamiento de regeneración (3) el cual ha eliminado los compuestos responsables de la formación del máximo absoluto de la respuesta previa al tratamiento (1)

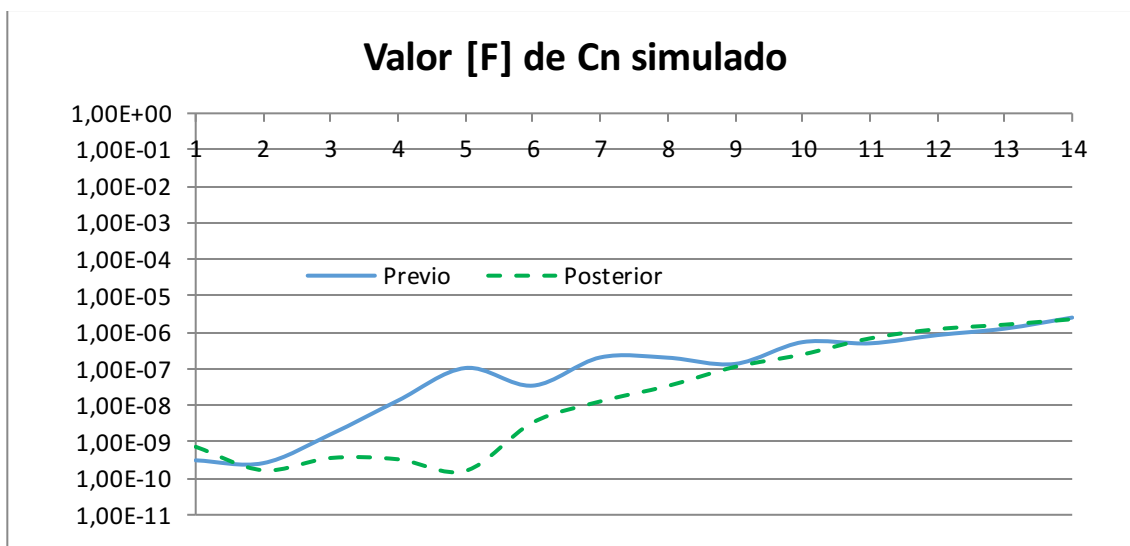


Figura 191 Valor de la capacidad de cada una de las ramas del circuito equivalente.

La evaluación de la evolución de la capacidad de los condensadores de cada una de las 14 ramas del circuito equivalente de Debye empleado para modelar la respuesta puede considerarse que está en línea con las observaciones realizadas anteriormente.

Las primeras tres ramas no han variado sustancialmente producto de que el contenido en humedad del transformador no ha cambiado, mientras que las únicas ramas que han mostrado sensibilidad a la variación en la condición del transformador son las ramas entre la 5 y la 7 lo que a su vez también concuerda con lo indicado en experiencias anteriores.

Las ramas a partir de la 8 no muestran variaciones significativas entre el ensayo previo y el posterior al tratamiento, lo que indica que los compuestos contaminantes estaban fundamentalmente disueltos en el aceite y no existía una polarización interfacial excesiva, afirmación que está alineada con lo indicado en la valoración de la respuesta representada mediante el sistema tradicional representado en la figura 190.

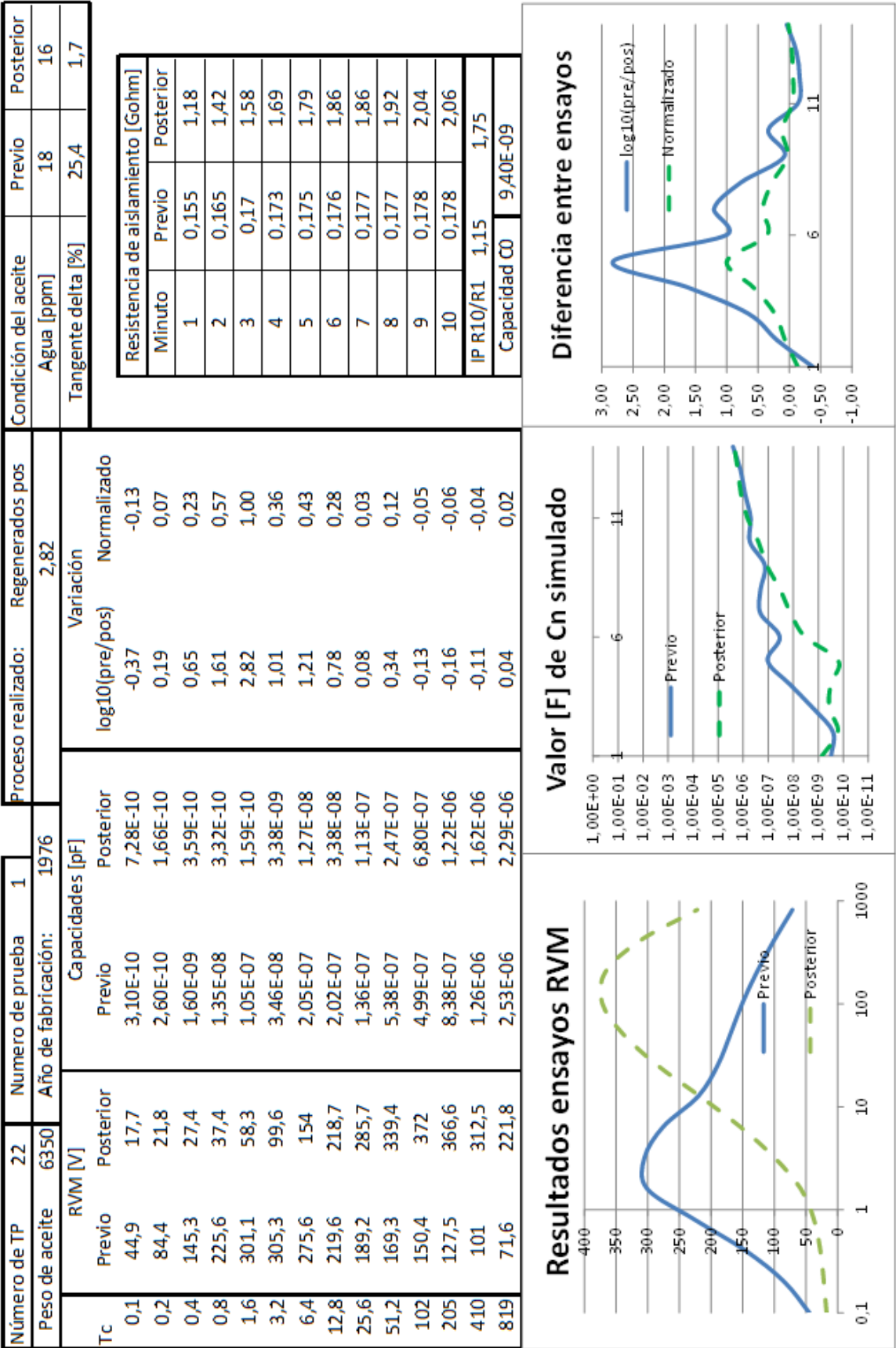


Figura 192 Cuadro resumen, Tp22 ensayo 1

7.5 Análisis en conjunto

Tras el análisis de los distintos casos de manera individualizada es conveniente realizar un análisis de los resultados en conjunto a fin de conocer los patrones de comportamiento identificables tras cada tipo de procedimiento llevado a cabo. Es necesario tener en cuenta que se trata de un análisis estadístico de una muestra no muy elevada de transformadores en algunos casos y que cada transformador tiene sus particularidades por lo que se entiende que los resultados han de tomarse como cualitativos, siendo su finalidad identificar las áreas y aquellas ramas que son sensibles, a la acción de cada tipo de tratamiento.

Para llevar a cabo el estudio en conjunto de los distintos ensayos se ha optado por emplear el logaritmo en base 10 del cociente entre el valor de la capacidad del condensador enésimo previo al tratamiento y posterior al tratamiento (figura 194), de esta manera es posible medir la relación entre ambas capacidades escalada de la misma manera que en la representación gráfica que se ha empleado a lo largo de este trabajo, otros sistemas como el cociente directamente o el porcentaje se han empleado no siendo su resultado tan visual. El segundo paso llevado a cabo es la normalización de la curva obtenida (figura 195). Esta normalización es necesaria para poder determinar para un conjunto las áreas de influencia. Idealmente el resultado sería un 1 para las ramas sobre las que el tratamiento prescrito tiene influencia y un cero para aquellas ramas que representan mecanismos de polarización para las cuales el tratamiento prescrito es inocuo.

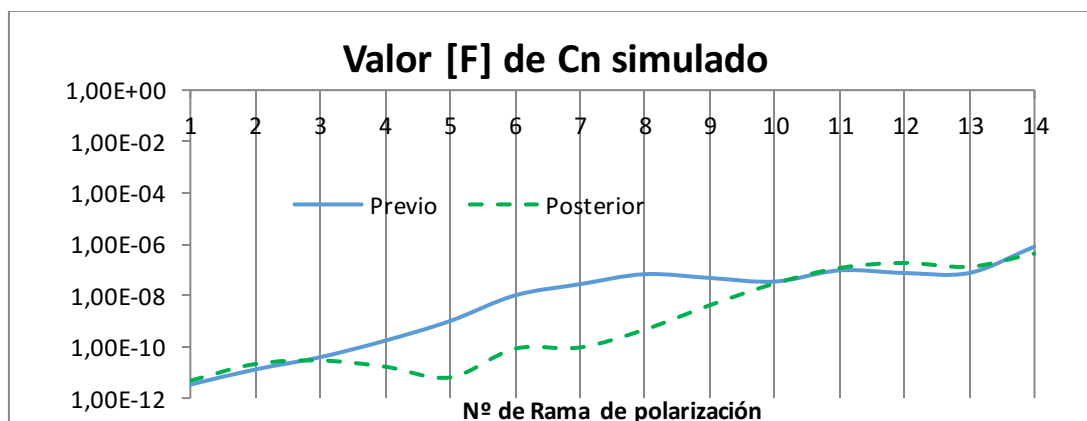


Figura 193 Representación de la capacidad C_n obtenida para el circuito equivalente de Debye del transformador 19 prueba 1.

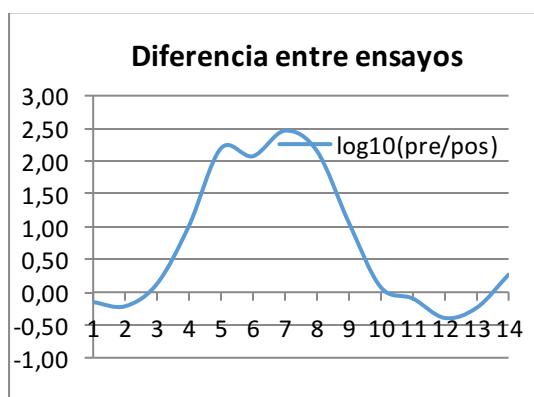


Figura 194 \log_{10} de la relación entre la capacidad previa al tratamiento y la capacidad de cada rama posterior al tratamiento

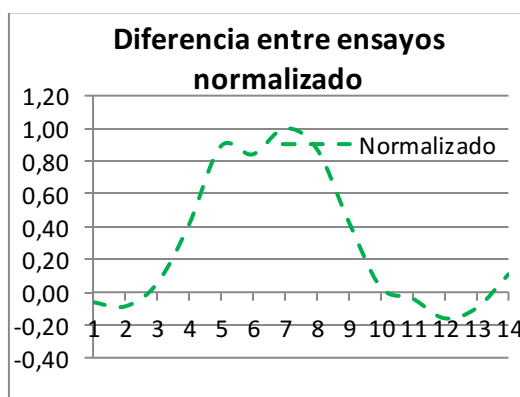


Figura 195 Valores normalizados del valor obtenido en el logaritmo de la relación entre los valores previos y posteriores al tratamiento de C_n

Como se puede apreciar en la Figura 195, podríamos observar mediante esta representación que las ramas que mayor sensibilidad han mostrado a un proceso de regeneración sin secado del aceite (se trata del transformador 19 prueba 1) son las ramas entre la 5 y la 8, mientras que para las otras ramas este tratamiento es inocuo.

Analizando los resultados obtenidos y presentados en los apartados del 7.4.1 al 7.4.31 en función del tratamiento al que se ha sometido al transformador podremos ver como las zonas de influencia son coincidentes en todos los transformadores pertenecientes a la misma familia.

7.5.1 Transformadores envejecidos

Se trata del grupo más pequeño de los transformadores analizados para este documento, siendo su presencia testimonial, dado que se ha primado el estudio de transformadores sometidos a un tratamiento del tipo que sea. Si bien han sido incluidos por resultar ilustrativo y darse la circunstancia de que se trata de los ensayos donde las ramas con constantes de tiempos más altas son sensibles al proceso de envejecimiento simplemente.

Tabla 53 Valores normalizados de las 14 ramas de los transformadores analizados tras un periodo de envejecimiento trabajando en un régimen estándar.

TP	Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
4	1	1,00	-0,04	-0,06	-0,06	-0,20	0,41	0,14	0,67	0,42	0,29	0,51	0,80	0,30	-0,24
17	1	0,03	0,27	-0,13	-0,19	-0,05	0,93	0,64	1,00	0,66	0,61	0,56	0,39	0,23	-0,05
Promedio		0,52	0,11	-0,10	-0,13	-0,12	0,67	0,39	0,84	0,54	0,45	0,54	0,60	0,27	-0,15

En el siguiente gráfico se representa el valor promedio normalizado para las distintas ramas del circuito equivalente de Debye.

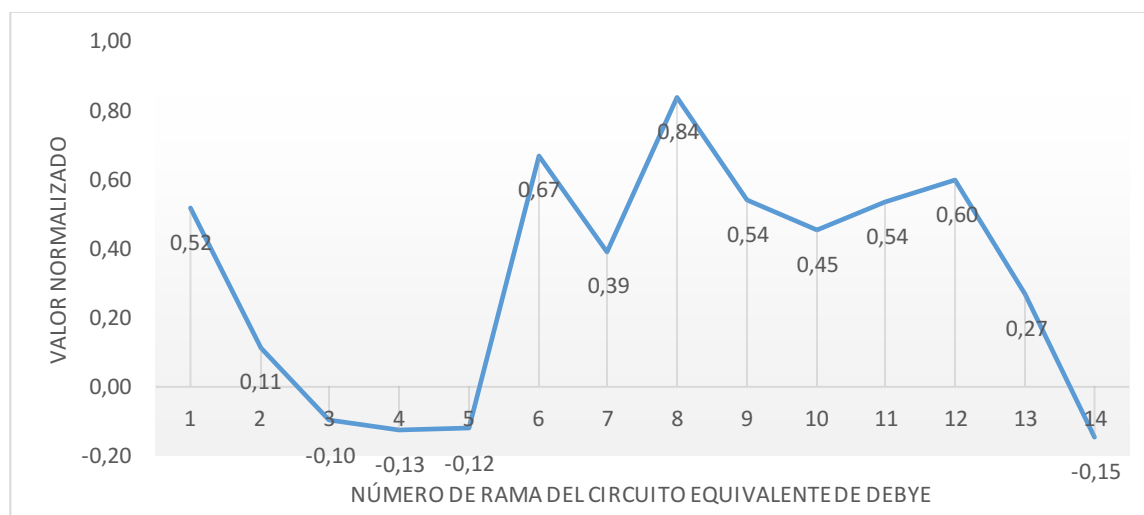


Figura 196 Valores normalizados de la variación de capacidad en cada una de las ramas del circuito equivalente de Debye

Como puede apreciarse en la figura 196 obviando la rama 1 que es influencia del ensayo del TP 4 y se puede entender como atípico ese dato en la simulación, puede observarse que las ramas más sensibles se encuentran entre la 6 y la 12, lo que induce a pensar que el proceso de envejecimiento está relacionado con la aparición de productos de la descomposición del papel en la interface papel-aceite.

7.5.2 Transformadores sometidos a un proceso de reacondicionado

Como ha sido remarcado en los análisis individuales, el reacondicionado es un proceso por el que solo se elimina la humedad del aceite, siendo insignificante el volumen de agua extraído del papel, se trata del procedimiento menos profundo dentro de los tratamientos a los que es posible someter a un transformador, prueba de ello es que las ramas con constantes de tiempo alto y medio son insensibles a este procedimiento.

Tabla 54 Valores normalizados de las 14 ramas de los transformadores analizados tras someterse a un tratamiento de reacondicionado

TP	Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1	-0,75	1,00	0,04	-0,14	0,18	-0,13	-0,16	-0,39	-0,42	-0,72	-0,54	-0,07	0,66	-0,30
2	1	-0,06	1,00	0,40	0,03	0,03	-0,17	-0,16	-0,04	0,04	0,06	0,10	0,14	0,18	0,21
10	1	-0,06	1,00	0,17	0,15	0,19	0,02	0,08	0,04	-0,05	-0,10	-0,04	-0,06	0,05	-0,09
Promedio		-0,29	1,00	0,20	0,01	0,13	-0,09	-0,08	-0,13	-0,15	-0,25	-0,16	0,00	0,30	-0,06

Como puede apreciarse tanto en la tabla 54 como en el siguiente gráfico (Figura 197), todos los tratamientos en los que se ha extraído el agua del aceite presentan su máximo en la rama nº2 por lo que se puede identificar esta rama como la más sensible. Es importante tener presente esta circunstancia dado que en los siguientes epígrafes en los que se trate las regeneraciones, al tratarse de un proceso que habitualmente se finaliza con un reacondicionado, se podrá observar como la rama nº2 muestra sensibilidad, hay que evitar por tanto que esta situación lleve a confusión, dado que en la mayoría de las ocasiones los procesos de regeneración concluyen con un proceso de reacondicionado, por lo que en ese caso la sensibilidad mostrada es a dos procedimientos simultáneos.

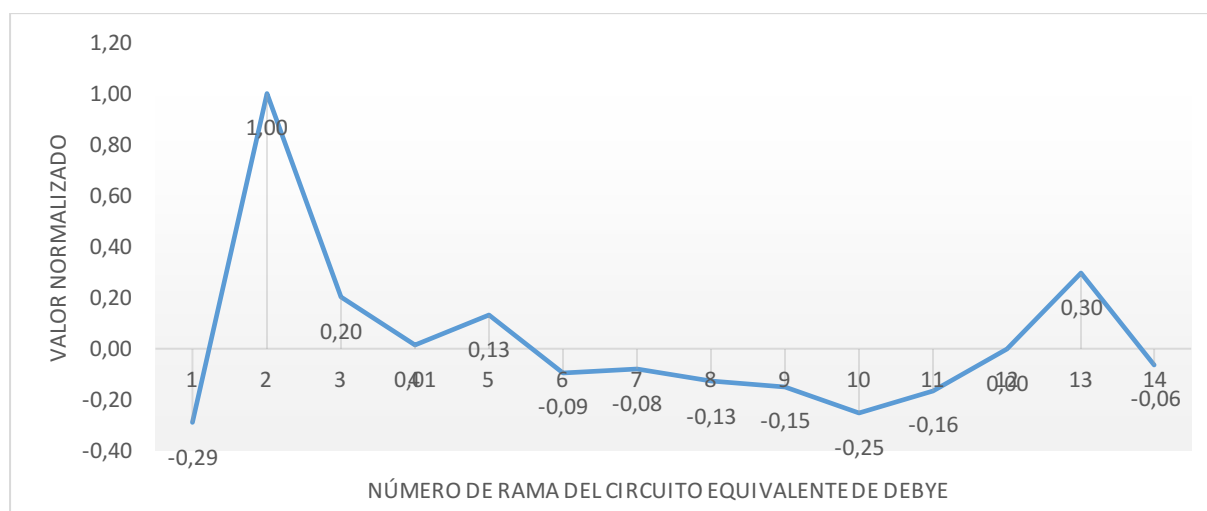


Figura 197 Valores normalizados de la variación de capacidad en cada una de las ramas del circuito equivalente de Debye

Adicional a la sensibilidad mostrada por la rama nº2, hay que resaltar el comportamiento del resto de ramas, cuyos valores son como máximo un 30% del valor de la rama nº2, aspecto que parece excesivo y que con el análisis de más casos probablemente la curva tendría una mayor convergencia hacia el 0.

El bajo valor de constante de tiempo de la rama sensible a la humedad en el aceite, puede deberse a que la molécula de agua como ha sido indicado en el apartado 4.2.2 y se ilustra en la figura 45 la molécula de agua experimenta polarización electrónica, iónica,

llegando a variar el ángulo formado entre los átomos en presencia de campo eléctrico, todos ellos mecanismos prácticamente instantáneos con la aplicación del campo E, de igual manera que en caso del agua la polarización orientacional es igualmente rápida al tratarse de una molécula muy pequeña que se encuentra disuelta en otro líquido.

7.5.3 Transformadores sometidos a un proceso de secado de parte activa

El proceso de secado de parte activa, al igual que el reacondiciona es un procedimiento prescrito para la extracción de la humedad, si bien en este caso es mucho más profundo, eliminándose la humedad disuelta en el aceite y extrayéndose la humedad del aislamiento celulósico.

Tabla 55 Valores normalizados de las 14 ramas de los transformadores analizados tras someterse a un tratamiento de secado de parte activa.

TP	Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
6	1	0,17	0,86	1,00	0,61	0,29	-0,07	0,04	0,02	0,04	-0,01	0,12	0,10	0,18	0,24
6	2	0,28	0,96	1,00	0,53	0,06	-0,15	0,06	-0,12	-0,07	-0,11	-0,09	-0,12	-0,09	-0,03
7	1	0,26	1,00	0,95	0,63	0,20	0,04	-0,08	-0,02	-0,03	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00
8	1	-0,04	1,00	0,37	0,19	0,14	-0,05	-0,04	-0,11	-0,13	-0,13	-0,15	-0,16	-0,13	-0,09
8	2	-0,16	1,00	0,28	0,09	0,07	-0,07	-0,04	-0,05	-0,07	-0,08	-0,10	-0,13	-0,13	-0,09
8	3	0,85	1,00	0,86	0,40	0,15	0,05	-0,04	-0,04	-0,06	-0,07	-0,06	-0,07	-0,06	-0,05
8	4	0,65	1,00	0,95	0,44	0,16	0,00	-0,01	-0,04	-0,05	-0,06	-0,08	-0,10	-0,10	-0,10
Promedio		0,29	0,98	0,77	0,41	0,15	-0,04	-0,02	-0,05	-0,05	-0,06	-0,05	-0,07	-0,05	-0,02

Al igual que en el caso anterior la rama más sensible a la eliminación de la humedad es la rama nº2, si bien a diferencia de lo que puede ser observado en los casos en los que el transformador solo se ha reacondicionado, en este caso se observa que las ramas que muestran sensibilidad al tratamiento se amplían a la nº3 extendiéndose si cabe a la 4.

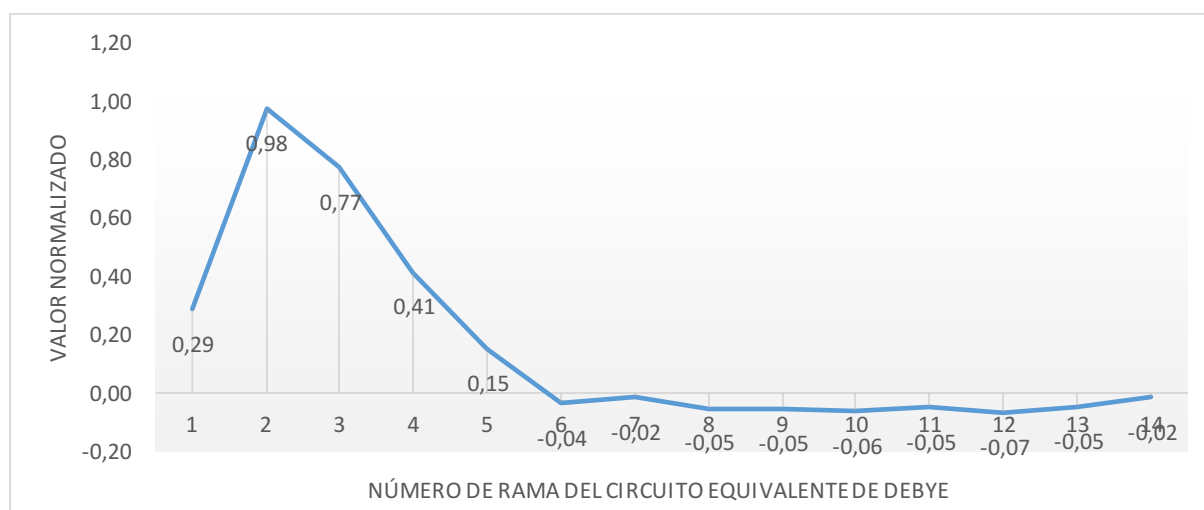


Figura 198 Valores normalizados de la variación de capacidad en cada una de las ramas del circuito equivalente de Debye

En la figura 198 se puede observar cómo las ramas nº 2 y nº3 son las más sensibles, pudiéndose observar adicionalmente que a partir de la rama nº 6 el valor de la variación es prácticamente 0 cumpliéndose así lo esperado que al aumentar el número de ensayos,

aquellas ramas que no son sensibles a los mecanismos de polarización afectados por el tratamiento prescrito convergerán a cero.

7.5.4 Transformadores con polarización interfacial sometidos a un proceso de regeneración.

Los transformadores sobre los que ha sido llevado a cabo un proceso de regeneración del aceite, y que adicionalmente antes de la ser regenerados han mostrado estar afectados por polarización interfacial son los que han sido incluidos en esta categoría.

Un transformador afectado por polarización interfacial es aquel en el que los compuestos polares presentes en la interface papel aceite predominan y solapan la respuesta del resto de compuestos, caracterizándose por una respuesta en la que la curva de tensión se reabsorción presenta un único máximo en tiempos medios.

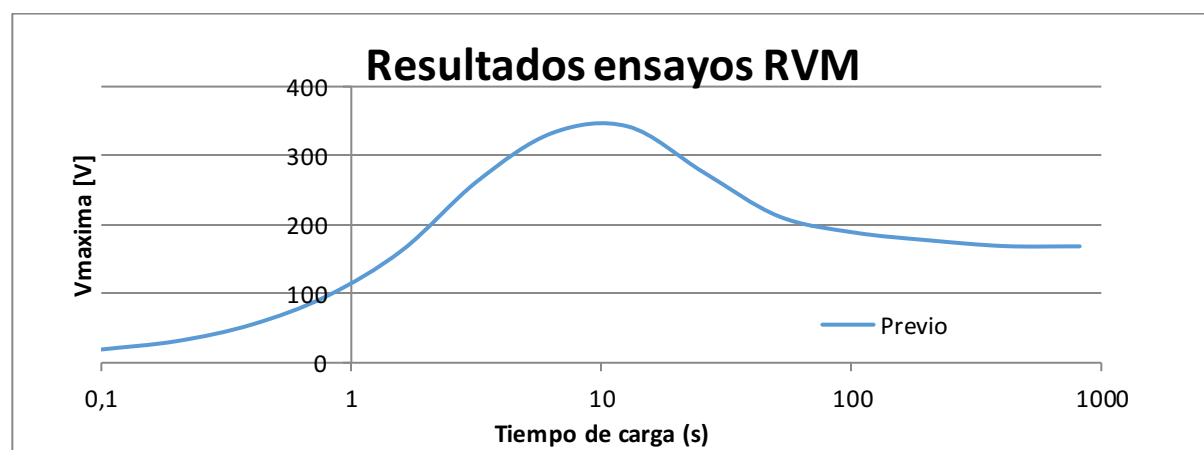


Figura 199 Ejemplo de respuesta RVM de un transformador afectado por polarización interfacial (transformador 16 prueba 1)

En este caso se puede observar que no es una única rama la que predomina, sino que es un conjunto de ramas, las nº6, nº7 y nº8 las que muestran la mayor sensibilidad al tratamiento, de regeneración.

Tabla 56 Valores normalizados de las 14 ramas de los transformadores analizados tras someterse a un tratamiento de regeneración.

TP	Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
4	2	0,15	0,38	0,30	0,46	0,86	0,81	1,00	0,68	0,45	0,18	-0,05	-0,21	-0,02	0,32
5	1	0,06	1,00	0,25	0,47	0,16	0,25	0,02	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	-0,01	-0,03
10	2	0,46	-0,86	0,22	0,45	0,36	1,00	0,70	0,86	0,84	0,60	0,19	0,21	0,21	0,55
11	1	0,18	0,24	-0,05	0,50	1,00	0,76	0,84	0,57	0,46	0,23	0,38	0,19	0,01	0,13
12	2	-0,09	0,19	0,01	0,10	0,64	0,25	1,00	0,43	0,09	0,10	-0,03	-0,06	0,06	0,22
14	1	-0,08	0,03	-0,03	0,24	0,63	0,65	0,90	0,91	0,93	0,74	0,76	1,00	0,35	0,52
16	1	0,36	0,11	0,08	-0,09	0,04	1,00	0,92	0,97	0,61	0,40	0,28	0,04	-0,06	0,39
17	1	0,03	0,27	-0,13	-0,19	-0,05	0,93	0,64	1,00	0,66	0,61	0,56	0,39	0,23	-0,05
19	1	-0,06	-0,09	0,05	0,41	0,89	0,84	1,00	0,88	0,43	0,03	-0,04	-0,16	-0,10	0,11
20	1	0,12	0,05	0,15	0,15	0,02	0,96	1,00	0,96	0,22	0,15	0,24	-0,08	-0,14	0,35
4	1	1,00	-0,04	-0,06	-0,06	-0,20	0,41	0,14	0,67	0,42	0,29	0,51	0,80	0,30	-0,24
Promedio		0,19	0,12	0,07	0,22	0,40	0,71	0,74	0,73	0,47	0,31	0,26	0,20	0,08	0,21

Como se puede apreciar en la tabla anterior es la rama nº7 la que muestra una mayor sensibilidad a la polarización interfacial, cierto es que en este caso no es una rama la que se muestra claramente, es más, todas las ramas entre la nº5 y la nº12 muestran sensibilidad al proceso llevado a cabo, cierto es que en una regeneración se extraen los compuestos polares disueltos en el aceite, así como se arrastran los compuestos polares depositados sobre las superficies de las bobinas. Es decir, no es un procedimiento enfocado en exclusiva a la limpieza de la superficie de los devanados de ahí que muestre una extensión más amplia en el número de ramas.

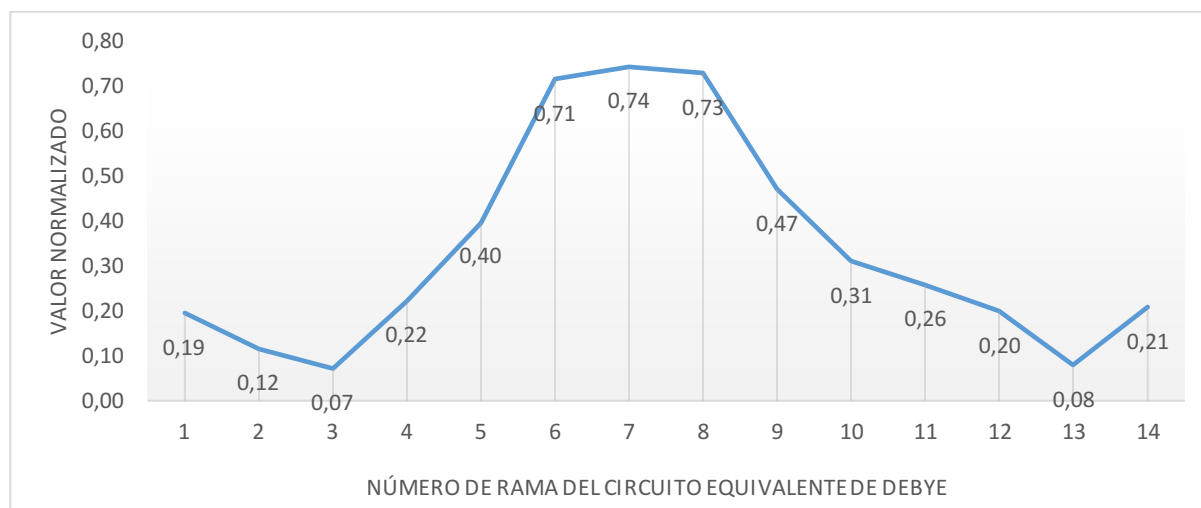


Figura 200 Valores normalizados de la variación de capacidad en cada una de las ramas del circuito equivalente de Debye

7.5.5 Transformadores sin polarización interfacial sometidos a un proceso de regeneración.

Los transformadores incluidos en este grupo son aquellos que sus parámetros fisicoquímicos indica que es necesaria una regeneración del dieléctrico, siendo esta necesidad corroborada por la forma de la curva de la respuesta RVM, si bien los efectos reflejados en el ensayo RVM no se encuentran solapados por un único máximo en los tiempos medios, como ocurre en aquellos transformadores en los que el efecto de la polarización interfacial solapa cualquier otro efecto.

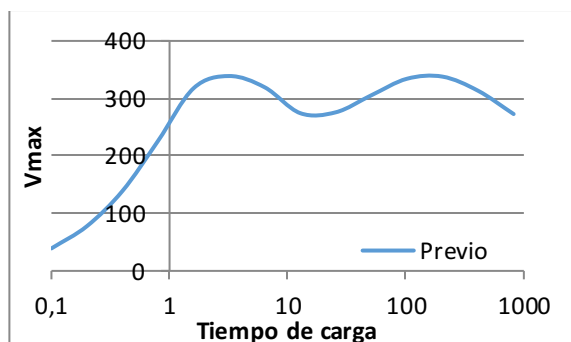


Figura 201 Transformador 12_prueba 1

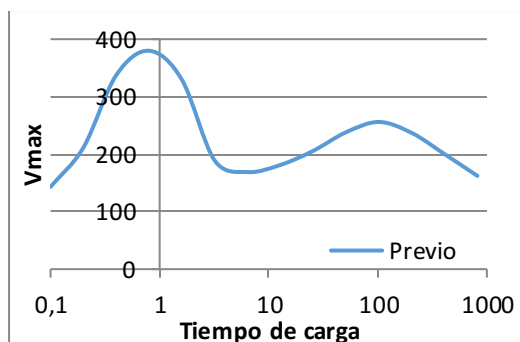


Figura 202 Transformador 15 prueba 1

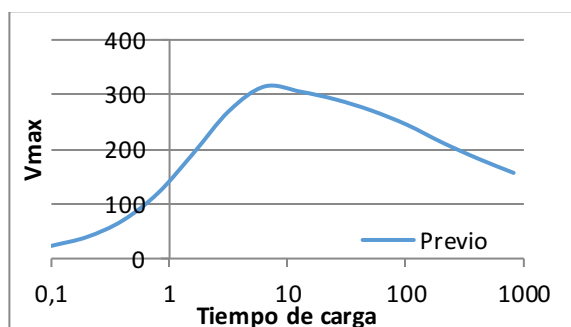


Figura 203 Transformador 9 prueba 1

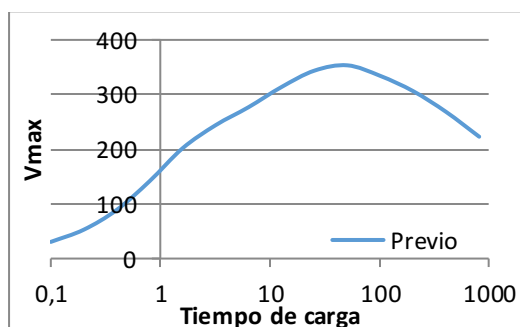


Figura 204 Transformador 14 prueba 1

La frontera entre transformadores afectados y no afectados por polarización interfacial es difusa, como se puede observar en las imágenes anteriores, existe una evolución en la condición del transformador desde un primer estadio en el que es sencillo identificar un máximo absoluto y un máximo relativo en la curva (figura 201), hasta el punto en el que ambos máximos se aproximan convergiendo en la zona media (figura 203 y figura 204), haciendo prácticamente imposible discernir estos máximos, por lo que resultados como el obtenido en el transformador 14 prueba 1 en la práctica pueden ser catalogados (y así ha sido) como transformadores afectados por polarización interfacial.

En base a esta distinción, como se ha indicado difusa, los transformadores cuya respuesta dieléctrica no muestra únicamente polarización interfacial son los que se tabulan a continuación.

Tabla 57 Valores normalizados de las 14 ramas de los transformadores analizados tras someterse a un tratamiento de regeneración.

TP	Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
3	1	0,03	0,57	0,51	0,80	1,00	0,39	0,63	0,27	0,19	0,04	0,02	-0,04	0,11	-0,03
3	2	-0,01	0,56	0,43	0,73	1,00	0,71	0,66	0,46	0,24	0,04	-0,04	-0,15	-0,04	-0,27
9	1	-0,02	-0,15	0,17	0,65	1,00	0,82	0,56	0,03	0,20	-0,06	0,24	0,16	0,11	0,00
12	1	-0,09	-0,07	0,08	0,33	1,00	0,87	0,88	0,32	0,34	0,16	0,39	0,50	0,01	0,22
13	1	-0,09	0,19	0,01	0,10	0,64	0,25	1,00	0,43	0,09	0,10	-0,03	-0,06	0,06	0,22
15	1	0,47	0,01	0,72	1,00	0,68	-0,05	0,77	0,30	0,05	0,07	0,12	0,08	-0,06	0,21
16	2	-0,18	0,07	-0,06	0,33	0,92	1,00	0,86	0,37	0,26	0,04	0,10	0,02	0,02	0,06
18	1	-0,06	-0,08	-0,02	0,14	1,00	0,63	0,64	0,10	0,09	-0,07	0,12	0,29	-0,25	-0,02
18	2	-0,19	0,01	0,04	0,14	0,48	0,18	1,00	-0,01	0,01	-0,01	0,03	0,24	0,00	0,03
21	1	0,11	0,23	0,11	0,56	1,00	0,83	0,75	0,46	0,16	0,28	0,03	0,20	0,37	0,10

22	1	-0,13	0,07	0,23	0,57	1,00	0,36	0,43	0,28	0,03	0,12	-0,05	-0,06	-0,04	0,02
Promedio		-0,02	0,13	0,20	0,49	0,88	0,55	0,74	0,27	0,15	0,06	0,08	0,11	0,03	0,05

En este caso puede observarse que la rama más sensible al tratamiento es la nº5 siendo la siguiente rama más sensible la nº7, es decir hay dos ramas que claramente destacan, lo que refuerza la idea de que se están retirando compuestos polares disueltos en el aceite rama nº5 que en el caso anterior no predominaba y compuestos polares depositados sobre el aislamiento sólido.

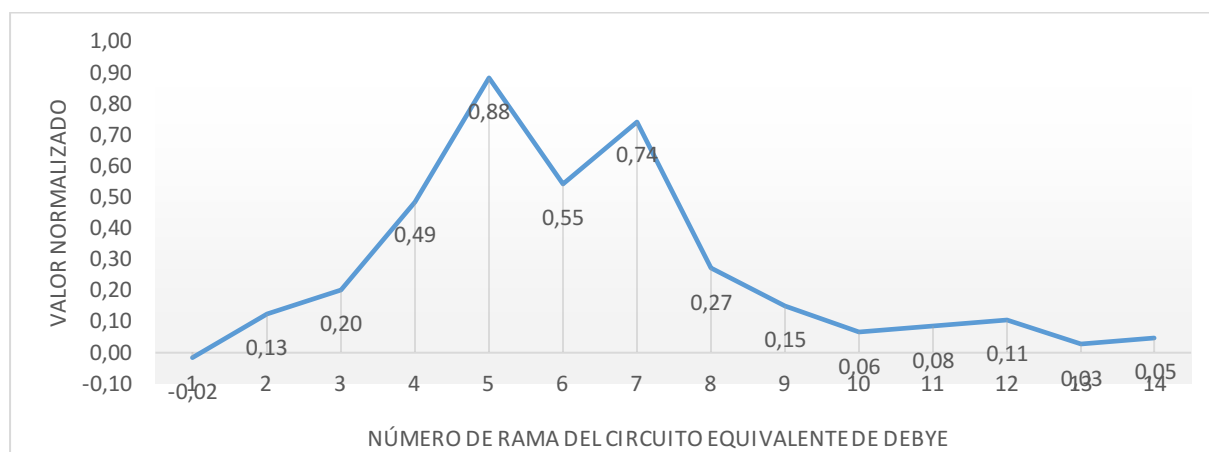


Figura 205 Valores normalizados de la variación de capacidad en cada una de las ramas del circuito equivalente de Debye

Como se indicado, la existencia de compuestos polares en el aceite sin que existan contaminantes disueltos que se adhieran a las partes expuestas del aislamiento solido es en práctica imposible, de ahí que tanto en el proceso presentado en el epígrafe anterior como en el mostrado en este epígrafe coexistan ambos, si bien lo que se pretende es separar aquellos en los que predomina la polarización interfacial y los que no.

7.5.6 Análisis de la superposición de respuestas en base al tratamiento

De la superposición de todos los efectos obtenidos es posible observar cómo a lo largo de todo el espectro, ya sean el número de la rama o ya sea en base al tiempo de carga los distintos efectos se suceden.

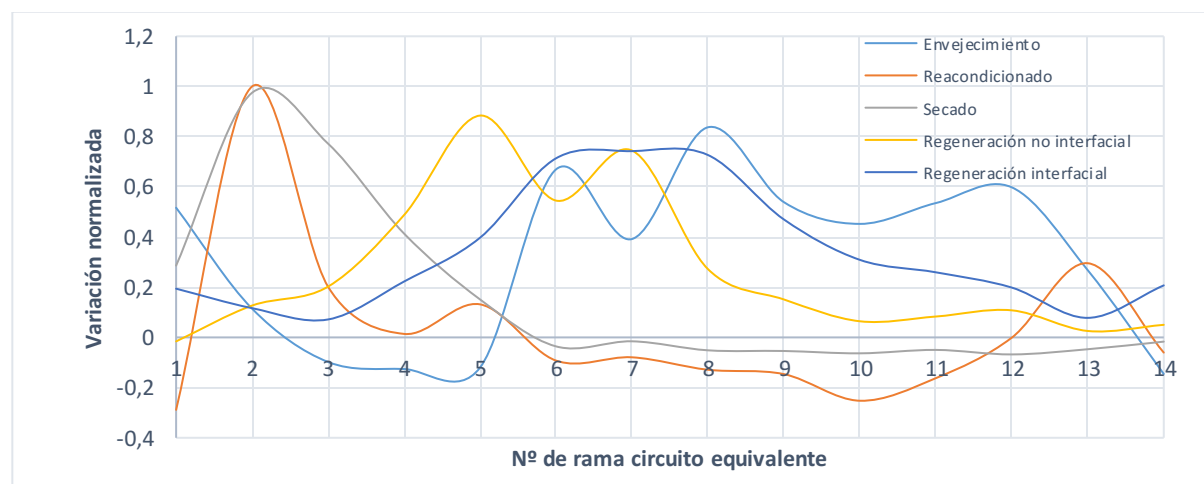


Figura 206 Variación normalizada de las distintas ramas del circuito equivalente en función del tipo de tratamiento. Representado por nº de rama.

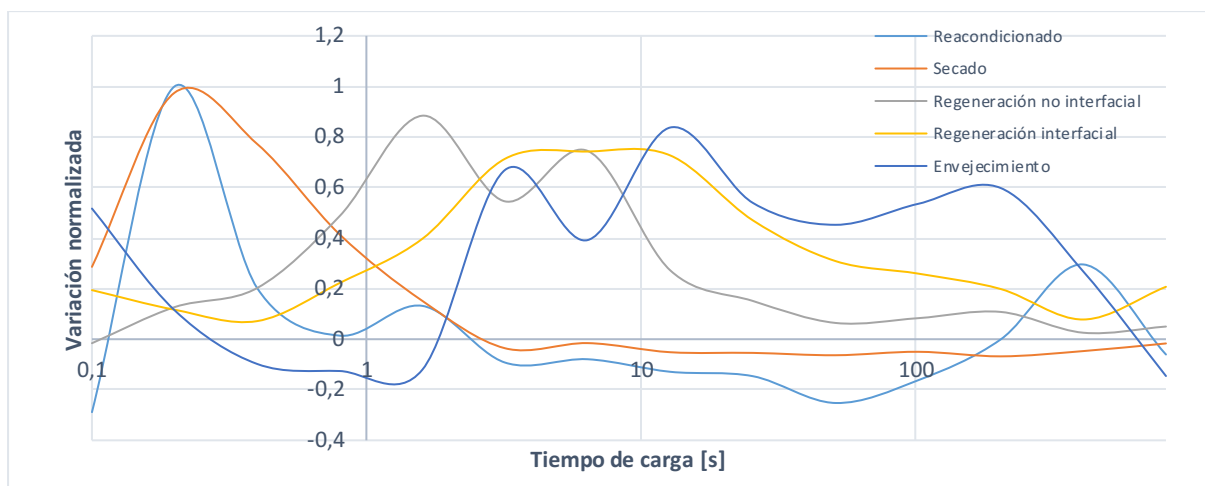


Figura 207 Variación normalizada de las distintas ramas del circuito equivalente en función del tipo de tratamiento. Representado por tiempo de carga.

Si es realizado un recorrido de izquierda a derecha por los distintos efectos, será posible apreciar que los tratamientos de extracción de humedad tanto el reacondicionado, así como el secado de parta activa, en ambos casos la rama más sensible a estos tratamientos en la nº2, si bien es posible apreciar que cuando el secado es más profundo el número de ramas sensibles se extiende hasta la nº3 y en menor medida la 4.

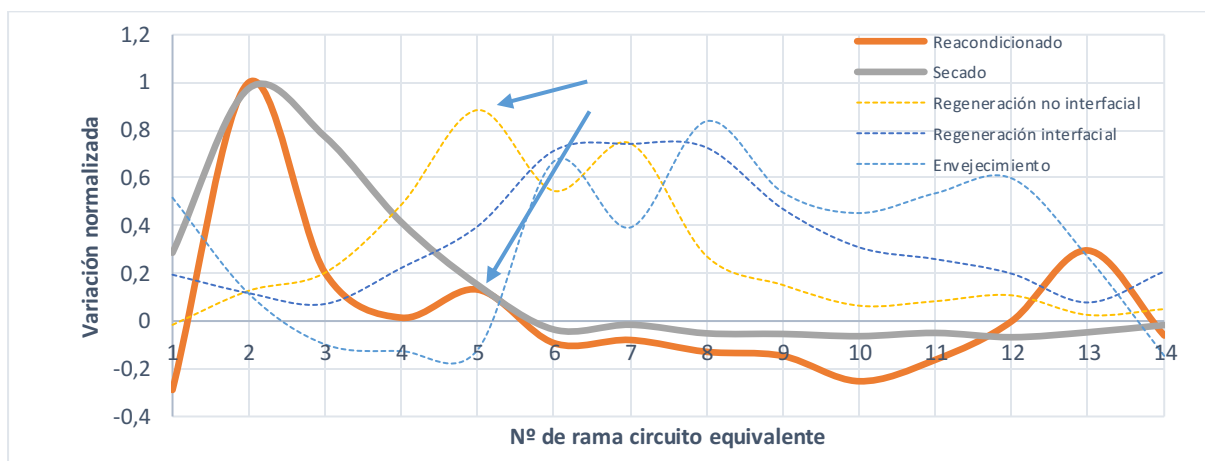


Figura 208 Variación normalizada de las ramas tras tratamientos en los que se elimina la humedad

Es necesario resaltar de la figura 208 la rama nº5 (1) se observa un pequeño máximo relativo, en especial cuando se hace un reacondicionad que coincide con un máximo que presentan las curvas en las que se ha realizado una regeneración de un transformador no afectado por polarización interfacial, lo que es indicativo que aunque no es el fin último de un secado o un reacondicionado el mero proceso elimina una pequeña parte de otros compuestos polares que puedan estar disueltos en el aceite, como se ha identificado en el apartado 7.5.5 la rama cinco podría ser asociada a compuestos polares disueltos en el aceite.

El siguiente tratamiento, siguiendo el recorrido de izquierda a derecha a través del gráfico de variaciones normalizadas será el tratamiento de regeneración en aquellos casos en los que la polarización interfacial no es predominante, si no que existe una gran cantidad de compuestos polares disueltos en el aceite sin que aparentemente la interface papel aceite se encuentre muy contaminada, siempre sin olvidar que, aunque en menor proporción siempre existirá polarización interfacial.

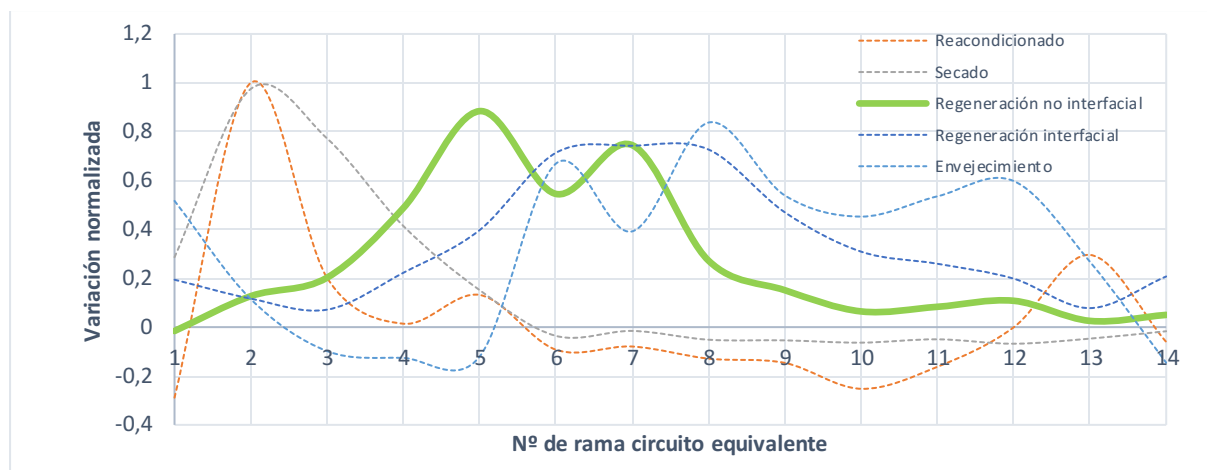


Figura 209 Variación normalizada de las ramas tras tratamientos de regeneración en aquellos transformadores en los que no se aprecia polarización interfacial como único efecto.

En la figura 209 se puede apreciar como el primer máximo se encuentra en la rama nº5 al tiempo que existe un segundo máximo relativo en la rama nº7, puede observarse que comienza en el punto donde se anula el efecto de los tratamientos de reacondicionado y que su efecto predominante se extiende hasta la rama nº7, que como se observa en la siguiente figura (figura 210) en el que se regeneran aquellos transformadores afectados por polarización interfacial, se trata de la rama media de las ramas predominantes, las cuales son las comprendidas entre la nº6 y la nº8.

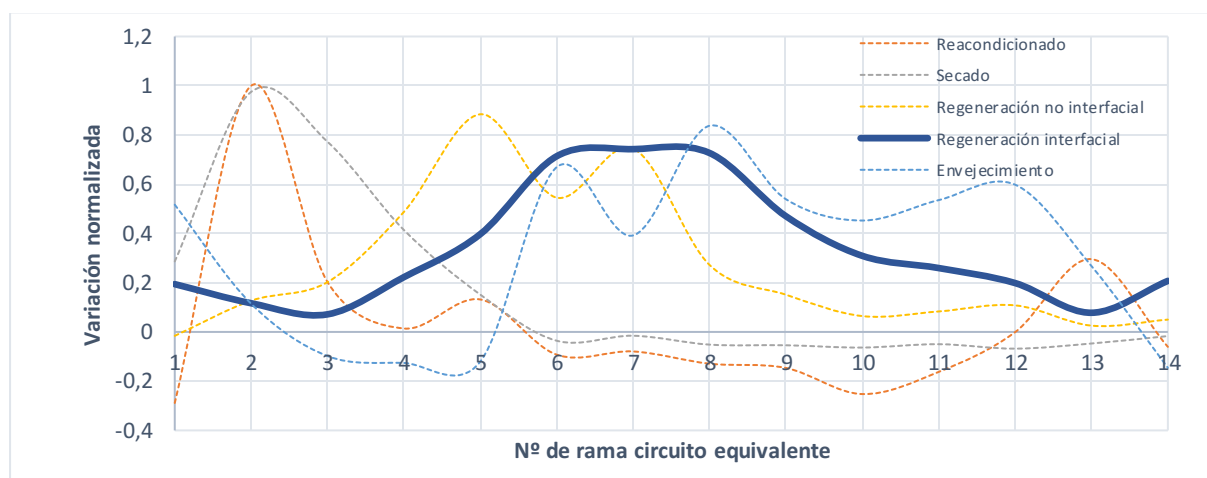


Figura 210 Variación normalizada de las ramas tras tratamientos de regeneración en aquellos transformadores en los que se aprecia polarización interfacial como único efecto.

A diferencia de lo observado en los tratamientos de eliminación de la humedad puede observarse que tanto en la figura 209 como en la figura 210, la formación de una meseta por los máximos, no existe una única rama dominante, y como el efecto en las ramas colindantes no decae de manera abrupta, esto se debe que se trata de tratamientos menos focalizados dado que eliminan varios compuestos polares y no polares del transformador, de ahí que el proceso de regeneración haga pasar el aceite por diversos filtros y tipos de tierras, cada uno enfocado a un tipo de contaminación (polar o no polar, soluble o insoluble ...)

Los tratamientos de regeneración de transformadores afectados por compuestos polares en la interface papel-aceite muestran cierta sensibilidad hasta ramas muy elevadas, prácticamente hasta la rama nº 12, no quiere decir que se eliminen compuestos diferentes o más compuestos que en una regeneración realizada a un transformador no afectado por

polarización interfacial, lo que representa esta profundidad en las ramas afectadas es que el transformador estaba más contaminado en su dieléctrico sólido y se ha limpiado. Una primera aplicación directa que se puede extraer es para la valoración de los trabajos de regeneración, siempre que la curva de RVM muestre que existe polarización interfacial, el tratador o el mantenedor habrá de tener en cuenta que será necesario realizar un tratamiento que limpie la superficie de las bobinas, ya sea con más ciclos de filtrado o bien chorreando directamente la superficie de las bobinas con aceite de sacrificio para poder limpiarlas.

Por último, en la figura 211 se evalúa la sensibilidad de las distintas ramas a un envejecimiento que puede ser denominado natural de un transformador sin que sea aplicado tratamiento externo alguno, como se puede observar en el área marcada con un círculo (2), se observa cómo el transformador genera poco a poco compuestos polares que se depositan en el interface del papel aceite, parte son lodos producto de la descomposición del aceite, si bien otra parte son compuestos que se generan en el propio papel, hay que indicar que para este caso no se ha evaluado el cociente del previo respecto al post tratamiento, si no que se ha hecho al contrario, ha sido evaluado el análisis posterior respecto al previo ya que este proceso es de envejecimiento y contaminación y no de limpieza y regeneración.

Por último, un aspecto muy reseñable es el comportamiento de la rama nº12 se trata de una rama de constante de tiempo muy elevado 204,8 segundos, tiempo en el que polariza el aislamiento sólido deteriorado, correspondería a los primeros productos de descomposición del papel incluso a las primeras fibras de papel con cadenas o grado de despolarización más bajo, puede ser observado que en los tratamientos de regeneración una pequeña parte de estos compuestos o estas pequeñas fibras deterioradas son eliminadas a tenor del pequeño máximo relativo que se da en esa rama.

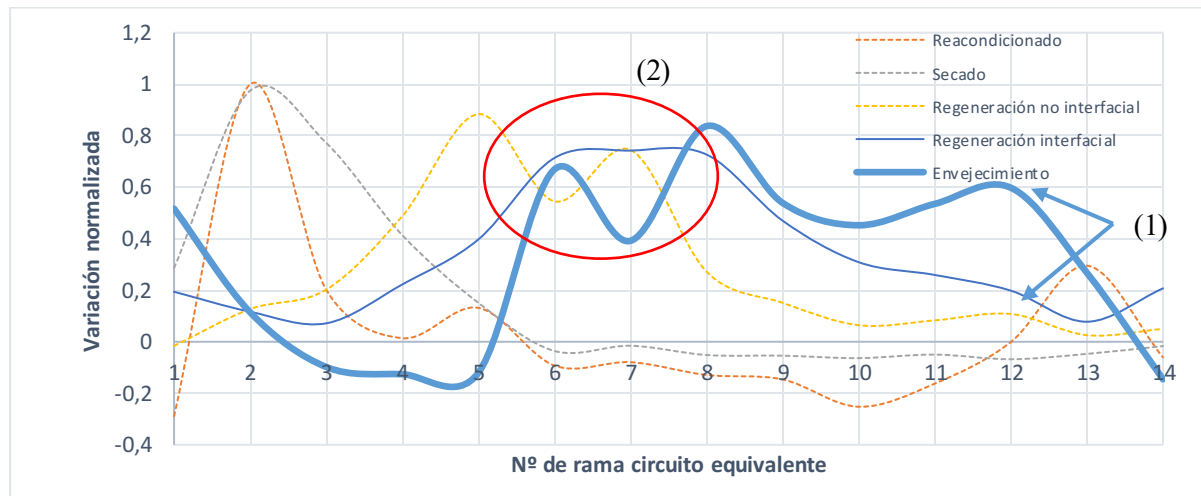


Figura 211 Variación normalizada de las ramas a lo largo de un periodo prolongado de envejecimiento natural del transformador.

7.5.7 Áreas de influencia

En base a lo expuesto en los apartados anteriores y la correlación empírica entre los tratamientos realizados y los efectos observados, unas fronteras, aunque no absolutamente nítidas, pueden ser establecidas entre los diferentes efectos observados.

- Efecto de la humedad, como ha sido indicado en el apartado anterior y en los apartados ensayos individuales y siendo uno de los efectos más claros, dado que en este caso el procedimiento llevado a cabo se centra en una única molécula, se puede

inferir que la rama más sensible a la variación de la concentración de agua disuelta en el aceite es la nº2 (0,2 segundos de constante de tiempo). Para los casos en los que es aplicado un secado más profundo y el secado incluye el asilamiento celulósico este efecto se extiende a la rama nº3 (0,4 segundos de constante de tiempo).

- En los casos en los que existen partículas polares disueltas en el aceite la rama nº5 (1,6 segundos) muestra mucha sensibilidad, así mismo la rama nº7 (6,4 segundos de constante de tiempo) cuando los efectos están bien separados y se muestran dos máximos, esto puede ser interpretado como compuestos polares filtrados en la celulosa del aislamiento sólido o productos de descomposición del propio aislamiento sólido.
- En los casos en los que la polarización interfacial predomina es la rama nº7 la que marca la mayor sensibilidad, si bien prácticamente tienen la misma sensibilidad las ramas 6 y 8.
- Los efectos del envejecimiento de un transformador, se denotan por la sensibilidad de las ramas 6 y 8 es decir la generación de sub-productos de descomposición, acompañados del aumento de la capacidad de todas las ramas de la nº9 a la nº 13, es reseñable el efecto que se observa en la rama nº12 (con constante de tiempo 204,8 segundos) en la que se haya un máximo relativo, sincronizado con pequeños máximos relativos observados en los tratamientos de regeneración, lo que se puede leer como que esa rama tiene sensibilidad a uno de los productos de descomposición, que son eliminados en los tratamientos en los que se capturan compuestos polares, es decir en la regeneración.

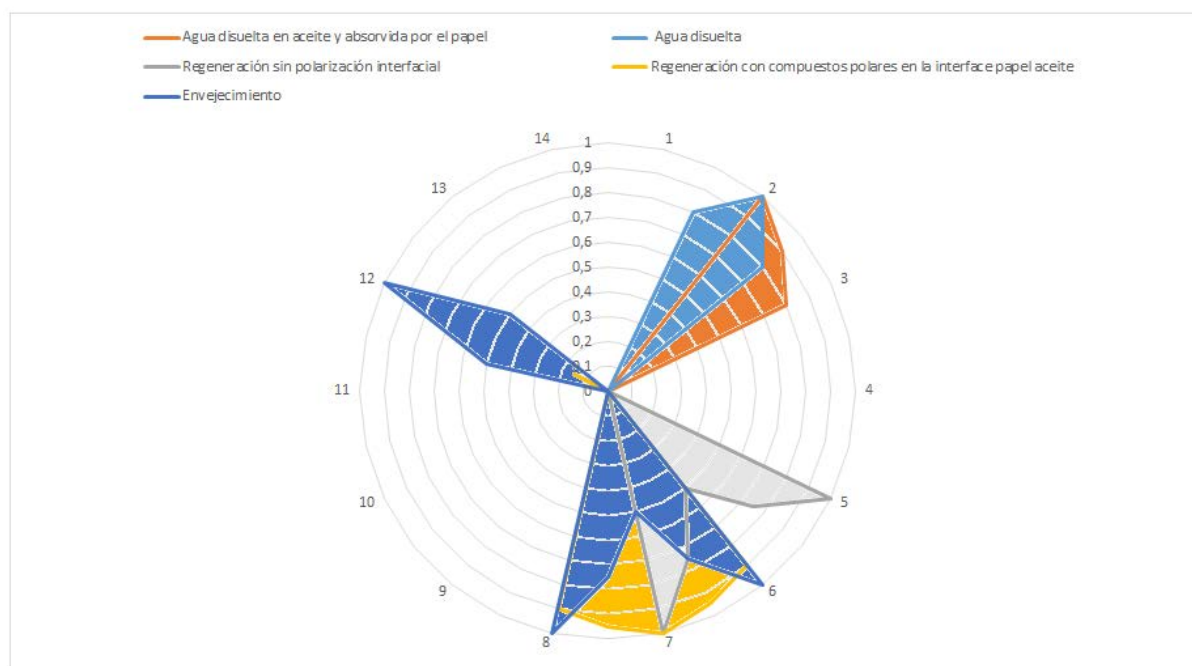


Figura 212 Representación de las distintas áreas de influencia en función del tratamiento realizado

Así mismo, puede realizarse un ejercicio similar mostrando la distribución de los distintos contaminantes o su posición, no en función del tratamiento si no del tipo de contaminante presente en el transformador en función de la rama que muestre sensibilidad, es necesario reseñar que en este caso las fronteras son más difusas y como ha sido indicado con anterioridad, los tratamientos de secado son tratamientos enfocados a una sustancia en particular y a una zona en concreto, si bien en el caso de los tratamientos de regeneración son varios los filtros instalados para distintos tipos de contaminante y el área de acción del tratamiento es más compleja de determinar si bien las áreas identificadas podrían ser las que ilustra la figura 213.

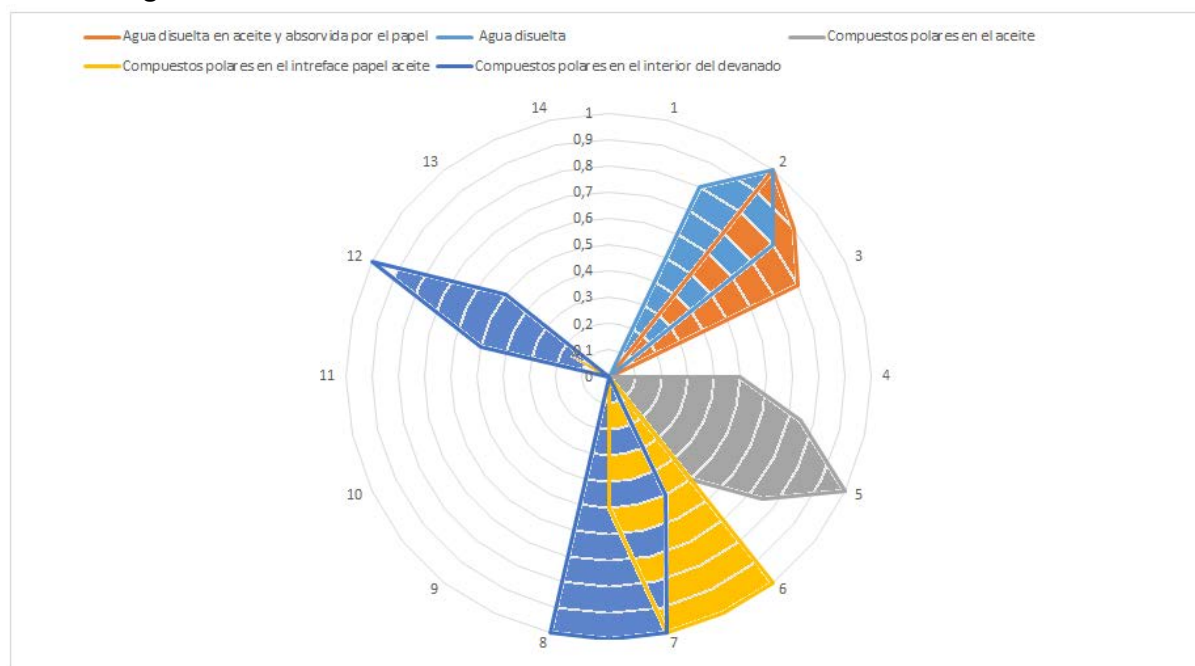


Figura 213 Representación de las distintas áreas de influencia de los contaminantes y dónde se encuentre en el transformador.

8 Conclusiones

En el presente epígrafe son presentadas las conclusiones más significativas alcanzadas a lo largo de la Tesis, adicionalmente se hará referencia a las principales contribuciones de esta y se revisarán las posibles líneas de trabajo abiertas como trabajos posteriores a la Tesis, por último, se hará referencia a las contribuciones y artículos generados durante este trabajo.

8.1 Conclusiones generales

Dos de las primeras premisas a las que se hace referencia en este documento son de acuerdo con sendos brochures de Cigré:

- *“RVM, PDC and FDS. It concluded that all three methods are sensitive to the same polarization and conduction phenomena in the transformers' dielectric, and that regardless of whether time or frequency domain measurements are used, mathematical modeling is necessary to understand the properties of an insulation system”* [51].
- *“Intermediate time constant values may exclusively show interfacial polarization effects, hiding other insulation characteristics”* [51].

En base a estas premisas ha sido desarrollado un algoritmo mediante el cual se adapta un circuito equivalente de Debye conformado por 14 ramas cada una de ellas con una constante de tiempo igual al tiempo de carga para cada uno de los ciclos de reabsorción realizados durante los test. El hecho de emplear un circuito con la constante de tiempo predefinida para cada una de las ramas permite a diferencia de los circuitos equivalentes publicados [30], [34], [35] (en los que se intenta resolver el circuito con el menor número posible de ramas y siendo la constante de tiempo de las ramas aquella que matemáticamente conviene) el medir la variación de cada una de las ramas pudiendo así evaluar la sensibilidad de cada constante de tiempo ante un determinado tratamiento, este método se ha revelado como el pilar fundamental para determinar el área de influencia de los distintos contaminantes en el transformador.

Se ha demostrado como el empleo del circuito equivalente calculado mediante el algoritmo diseñado, permite valorar las variaciones en el contenido de humedad en aquellos transformadores en los que la fuerte polarización interfacial hace imposible con la representación tradicional hacer evaluación alguna, aun en los casos en los que la componente de polarización interfacial persiste incluso después de llevar a cabo un tratamiento de aceite, ejemplos de esta capacidad y por lo tanto esta mejora en la capacidad de diagnóstico se pueden apreciar en los apartados, 7.4.1, 7.4.2, 7.4.7, 7.4.8, 7.4.9, 7.4.10, 7.4.12, 7.4.14 y 7.4.16.

Por último, mediante la correlación entre la variación de parámetros fisicoquímicos, los tratamientos llevados a cabo sobre los transformadores y la variación de la capacidad de las distintas ramas del circuito equivalente se han podido determinar las áreas de influencia de los distintos compuestos contaminantes que se pueden encontrar en un transformador.

8.2 Contribuciones principales

Las principales contribuciones presentadas en este trabajo, tanto experimentales como de procedimiento son:

- Desarrollo de un algoritmo para la determinación de los valores de las ramas de polarización de un circuito equivalente de Debye, en nuestro caso se ha determinado que el circuito ha de presentar 14 ramas, todas ellas con constantes de tiempo predeterminadas, si bien el algoritmo es fácilmente adaptable al número de ramas y la constante de tiempo que se deseé para cada una de ellas.
- Se ha demostrado que el ensayo de tensión de reabsorción, trabajando sobre un circuito equivalente puede ser perfectamente válido, con la metodología descrita en este documento es posible sortear la barrera que supone el efecto de la polarización interfacial para la realización de un diagnóstico y el estudio de los distintos efectos a los que es sensible el ensayo de RVM.
- Se ha abierto el camino al empleo de la técnica RVM con más detalle para la validación o la valoración de los tratamientos realizados sobre el fluido dieléctrico o sobre el conjunto del aislamiento del transformador, mejorando el diagnóstico frente a métodos únicamente fisicoquímicos que no tienen capacidad de valorar los depósitos de compuestos en el interface papel aceite o los compuestos que se encuentran dentro del papel, en ocasiones invisibles hasta la puesta en servicio del transformador.
- Se ha determinado de forma cualitativa las áreas de influencia de los distintos compuestos dentro del barrido de constantes de tiempo que componen las ramas del circuito equivalente de Debye.

8.3 Trabajos subsiguientes a esta tesis

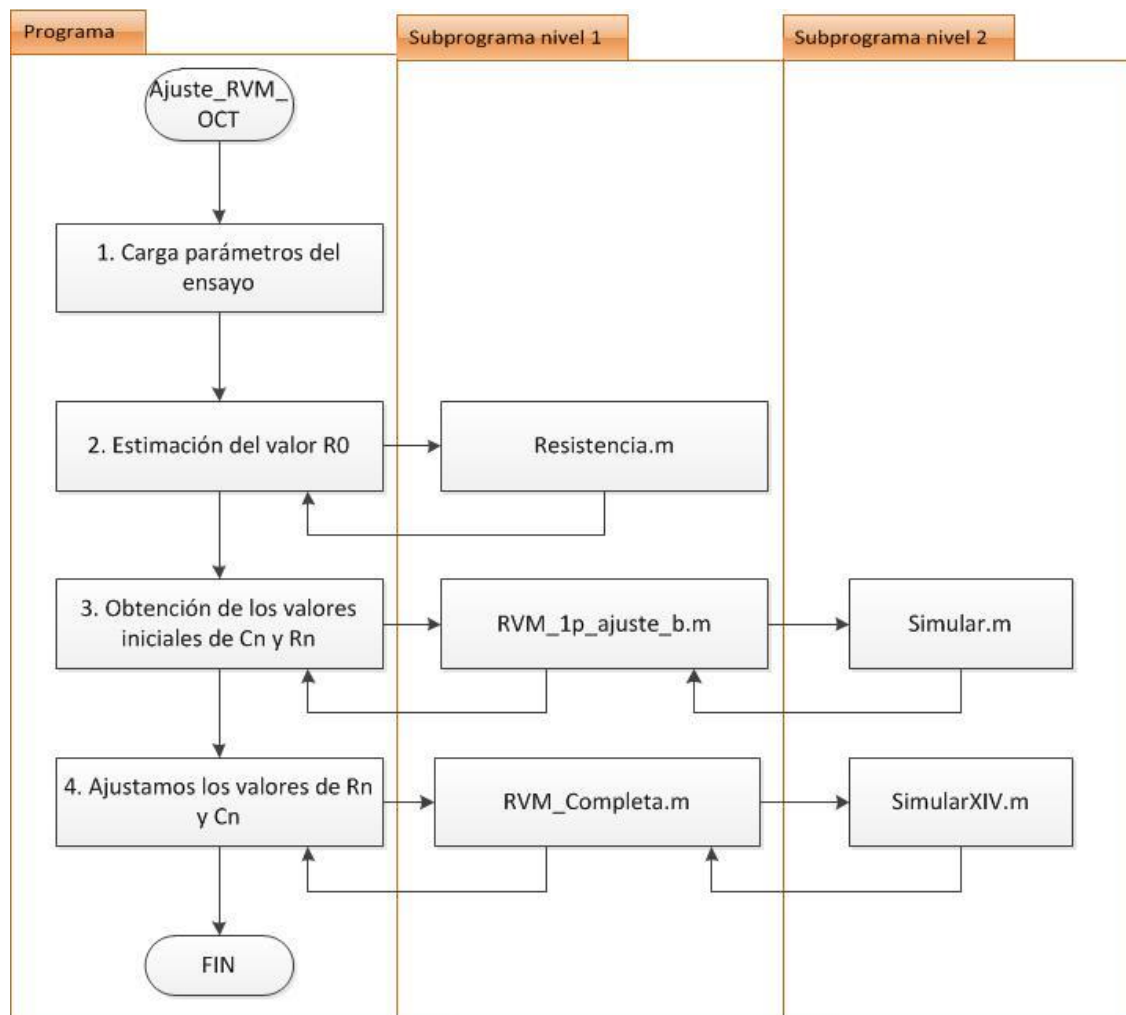
Los resultados y la experiencia obtenidos en esta tesis permiten plantear múltiples líneas susceptibles de ser seguidas.

- Desarrollo de modelos en laboratorio con parámetros controlados que permitan realizar una valoración cuantitativa de los resultados de igual manera que actualmente se realiza con los ensayos de FDS los cuales se ajustan a modelos predefinidos para cuantificar parámetros como la humedad.
- Desarrollo de un procedimiento para la completa gestión de la vida de los activos, obteniendo valores de huella de transformadores nuevos, dando seguimiento a la evolución de las distintas ramas y anticipando circunstancias como pueda ser la formación de lodos o sedimentos sobre el aislamiento celulósico, pudiéndose así anticipar el problema.
- Evaluación de viabilidad de tratamientos, mediante un ensayo previo al tratamiento y calculando la variación esperada en base al tratamiento seleccionado a realizar, poder predecir la condición final a la que debería llegar al transformador tras dicho tratamiento.
- Optimización del algoritmo, ya sea en el número de ramas o en las constantes de tiempo para cada una de esas ramas.
- Optimización del ensayo de RVM en campo, mediante la optimización de las ramas necesarias y aquellas más sensibles, se puede trabajar en la optimización del procedimiento de ensayo en campo, eliminando las medidas en tiempos de carga que

no aporten, en función de los ciclos que se pudiera decidir que no son interesantes, o no aportan gran información, la reducción de tiempo de ejecución del ensayo puede ser notable.

9 Software

9.1 Mapa del software (Programa y subprogramas)



9.2 Ajuste_RVM_Oct

```
%%Programa para determinar los valores del circuito equivalente
% de Debye a partir de un ensayo RVM
```

```
%% 1 Cargar los parámetros del ensayo %%
```

```
%Cargamos el valor de resistencia Ohmica durante 10 minutos
load RES.mat;
```

```
%Cargamos los valores de tensión pico en los 14 ciclos
load RVM_objetivo;
```

```
%Cargamos la capacidad obtenida en el ensayo de capacidad y tg de
delta
load C0;
```

%% 2 Obtención del valor R0 %%

```
% Obtenemos el valor de R0 a partir de la extrapolación del
% ensayo de resistencia óhmica, ajustamos a una función
% logarítmica y extrapolamos a 300 minutos
```

```
% Obtenemos los coeficientes de la ecuación  $a1 \cdot \log(x) + a2$  que
% ajustan con los
% valores de resistencia obtenidos
```

```
p0=[0.1 0.1];
[coef]=fminsearch('resistencia_Oct',p0);
```

%% 2.1 Representamos la curva de resistencia calculada y la cura % obtenida en el ensayo

```
A=coef(1);
B=coef(2);
x=[1:1:10];
Y_trial=A*log10(x)+B;
Y_real=RES';
```

```
figure(21)
hold on;
plot(x,Y_real);
plot(x,Y_trial);
xlabel('t [minutos]');
ylabel('R [GOhm]');
title('Curva resistencia ajustada Vs Curva resistencia ajustada  
medida');
legend('Valor ensayo','Valor ajustado');
```

```
%% Fin de 2.1
```

```
%Obtenemos el valor R0 (en GOhm) extrapolando a 300 minutos
```

```
x=300;
R0=(coef(1)*log(x)+coef(2))*1E+9;
```

%% 3 Obtenemos los valores R C con los que vamos a hacer la primera iteración

```
% Estos valores son los que nos darían los valores de RC para un %  
solo parámetro
```

```
T=[0 0.1 0.2 0.4 0.8 1.6 3.2 6.4 12.8 25.6 51.2 102.4 204.8 409.6  
819.2];
C=[];
R=[];
for n=(2:1:15);
```

```

Tobj=T(n);
Vobj=RVM_objetivo(n);

[Cn,Rn]=RVM_1P_ajuste_b(C0,R0,Tobj,Vobj);

C(n-1)=Cn;
R(n-1)=Rn;
end
hold on;
plot(T,RVM_objetivo,'-o','LineWidth',4);

hold off

legend({'TR del ciclo(1)','TR del ciclo(2)','TR del ciclo(3)','TR
del ciclo(4)','TR del ciclo(5)','TR del ciclo(6)','TR del
ciclo(7)','TR del ciclo(8)','TR del ciclo(9)','TR del ciclo(10)','TR
del ciclo(11)','TR del ciclo(12)','TR del ciclo(13)','TR del
ciclo(14)','TR Objetivo'},'Location','northwest');
xlabel('tiempo de carga [sg]');
ylabel('Vmax [v]');

% el resultado final es que obtenemos dos vectores R y C que
% serán las ramas de nuestro modelo que ahora ajustaremos.

%% 4 Ajustamos los valores de Rn y Cn para obtener una respuesta
similar a la respuesta objetivo

[TR]=RVM_completa(C,R,R0,C0);
figure (41);
hold on;
plot(T,RVM_objetivo,'b');
semilogx (T,RVM_objetivo);
plot(T,TR,'r');
title('RVM obtenida Vs RVM simulada con las Cn individuales');
xlabel('tiempo de carga [sg]');
ylabel('Vmax [v]');

error=60
cont=1
while error>10
    [TR]=RVM_completa(C,R,R0,C0);

    Cons=[];
    for i=2:1:15;

        Cons(i-1)=RVM_objetivo(i)/TR(i);

% Bucle para finalizar el proceso si se alcanza el resultado
% finalizará cuando se alcance el resultado o se hayan
% completado las 50 iteraciones

        distancia=RVM_objetivo./TR;
        A=max(abs(log10(distancia)))

        if A<0.02

```

```

        error=2
    end

    C(i-1)=C(i-1)*Cons(i-1);
    R(i-1)=R(i-1)/Cons(i-1);
end

error=error-1
RVM_parcial(cont,:)=TR
C_parcial(cont,:)=C
cont=cont+1

end

```

9.3 Subprogramas nivel 1

9.3.1 Resistencia_Oct

```

function Errores=resistencia_Oct(p,X,Y);

%aquí sumamos los errores
%los parametros están en el vector p que es de dimensiones 2X1
% f=A*log(x)+B

load RES.mat %Cargamos los valores de resistencia medidos
X=[1:1:10];
Y_real=RES';
A=p(1);
B=p(2);
Y_trial=A*log10(X)+B; %los parametros Y de prueba
diferencia=Y_real-Y_trial;
Errores=sum(diferencia.^2);

```

9.3.2 RVM_1P_Ajuste

```

function [Cn,Rn]=RVM_1P_ajuste_b(C0,R0,Tobj,Vobj)

%El siguiente algoritmo dado el valor de un punto de la gráfica % de
RVM obtendrá por iteración los valores de R1 y C1 que más % aproximan
al valor de tensión medido en ese punto con una C0 y % R0 estimadas.

At=1;
Vf=2000;

%T1 es la constante de tiempo que queremos simular
T1=Tobj
%Error inicial
Err=1

```



```

%Parametros iniciales
C1=1.67e-12;
R1=3.36e10;

% Mandamos las siguientes ramas muy lejos en el tiempo, el %
programa está diseñado para 4 ramas originalmente por lo que % tres
de ellas las anulamos.

C2=1.26e-11;
C3=5.87e-12;
C4=4.84e-10;
R2=1.41e200;
R3=3.03e200;
R4=1.16E200;

%la variable Z es la que marca el número de gráfico

z=1;
%Iniciamos el contador

Vreab=0;

Tfin=2000;

%ejecutamos hasta <900, así paramos en el ciclo 14 = 819,2

while Err>0;
    C1P=C1;
    R1P=R1;

    [resultado,Vmax]=Simular(Tfin,At,T1,R0,C0,R1,C1,R2,C2,R3,C3,R4,C4,Vf
);
    C1=C1*2;
    R1=T1/C1;
    z=z+1;

    Err=Vobj-Vmax;

end

C1=C1P/2;
R1=R1P*2;

%%% Hacemos un segundo bucle más fino para ajustar mejor
Err=1;

%ejecutamos hasta <900, así paramos en el ciclo 14 = 819,2

while Err>0;
    C1P=C1;
    R1P=R1;
    [resultado,
Vmax]=Simular(Tfin,At,T1,R0,C0,R1,C1,R2,C2,R3,C3,R4,C4,Vf);
    C1=C1*1.05;
    R1=T1/C1;

```

```

    z=z+1;

    Err=Vobj-Vmax;

end

C1=C1P/1.05;
R1=R1P*1.05;

Cn=C1;
Rn=R1;
[resultado,
Vmax]=Simular(Tfin,At,T1,R0,C0,R1,C1,R2,C2,R3,C3,R4,C4,Vf);

Err=Vobj-Vmax;

T=[0 0.1 0.2 0.4 0.8 1.6 3.2 6.4 12.8 25.6 51.2 102.4 204.8 409.6
819.2];
%ejecutamos los ciclos
T1=0.1;
%la variable Z es la que marca el número de gráfico
z=1;

%ejecutamos hasta <900, así paramos en el ciclo 14 = 819,2

while T1 <900

[resultado,Vmax]=Simular(Tfin,At,T1,R0,C0,R1,C1,R2,C2,R3,C3,R4,C4,Vf
);
    T1=T1*2;
    z=z+1;
    TR(z)=[Vmax];

end

%Dibuja la gráfica de la tensión de reabsorción
figure(102);
hold on
plot(T,TR);
semilogx(T,TR);
title('Gráfica Vpico vs Tiempo de carga');

```

9.3.3 RVM_Completa

```

function [TR]=RVM_completa(C,R,R0,C0)

%load variables.mat
RVM=0;
load RVM_objetivo;
%Parametros para sacar del gráfico

C1=C(1);

```

```

C2=C(2);
C3=C(3);
C4=C(4);
C5=C(5);
C6=C(6);
C7=C(7);
C8=C(8);
C9=C(9);
C10=C(10);
C11=C(11);
C12=C(12);
C13=C(13);
C14=C(14);

R1=R(1);
R2=R(2);
R3=R(3);
R4=R(4);
R5=R(5);
R6=R(6);
R7=R(7);
R8=R(8);
R9=R(9);
R10=R(10);
R11=R(11);
R12=R(12);
R13=R(13);
R14=R(14);

T=[0 0.1 0.2 0.4 0.8 1.6 3.2 6.4 12.8 25.6 51.2 102.4 204.8 409.6
819.2];
%ejecutamos los ciclos
T1=0.1;
At=1;
Vf=2000;
%la variable Z es la que marca el número de gráfico
z=1;

Tfin=2000;
%ejecutamos hasta <900, así paramos en el ciclo 14 = 819,2
while T1 <900

[resultado,RVM,Vc1_r,Vab_r]=SimularXIV(Tfin,At,T1,R0,C0,R1,C1,R2,C2,
R3,C3,R4,C4,Vf,z,C5,R5,RVM,C6,R6,C7,R7,C8,R8,C9,R9,C10,R10,C11,R11,C
12,R12,C13,R13,C14,R14);
    T1=T1*2;
    z=z+1;
    TR(z)=[RVM];

end
T(1)=0.05
%Dibuja la gráfica de la tensión de reabsorción
%plot(T,TR);
%semilogx(T,TR,T,RVM_objetivo);

```

```
title('Gráfica Vpico vs Tiempo de carga');
```

9.4 Subprogramas nivel 2

9.4.1 Simular.m

```
function [resultado,Vmax]
=Simular(Tfin,At,T1,R0,C0,R1,C1,R2,C2,R3,C3,R4,C4,Vf)

%% DESCRIPCIÓN
%funcion para simular la respuesta de circuito RC
%a partir de los datos de entrada.

%% VARIABLES DE ENTRADA
% -Tini: tiempo inicial de simulacion
% -Tfin: tiempo final de simulacion
% -At: intervalo de tiempo entre dos instantes
% -T1: tiempo de aplicación de tensión
% -T2: tiempo de aplicación de corto
% -R0: resistencia paralelo
% -C0: capacidad paralelo
% -R1: resistencia serie primera rama
% -C1: capacidad serie primera rama
% -R2: resistencia serie segunda rama
% -C2: capacidad serie segunda rama
% -Vf: Tension de fuente aplicada en el ensayo

%% CUERPO DE LA FUNCIÓN

%por definicion el tiempo de descarga es la mitad que el de carga
T2=T1/2;

%calculo de Vc's para el primer periodo (Vab=Vf)
t1=[0:At:(T1)];
Vc1_p1=Vf*(1-exp(-t1/(R1*C1)));
Vc1l=Vf*(1-exp(-T1/(R1*C1)));
Vc2_p1=Vf*(1-exp(-t1/(R2*C2)));
Vc2l=Vf*(1-exp(-T1/(R2*C2)));
Vc3_p1=Vf*(1-exp(-t1/(R3*C3)));
Vc3l=Vf*(1-exp(-T1/(R3*C3)));
Vc4_p1=Vf*(1-exp(-t1/(R4*C4)));
Vc4l=Vf*(1-exp(-T1/(R4*C4)));
Vab_p1=Vf*ones(1,length(t1));

%calculo de Vc's para el segundo periodo (Vab=0)
t2=[(T1+At):At:(T1+T2)];
t2c=[0:At:T2];
Vc1_p2=Vc1l*exp(-t2c/(R1*C1));
```

```

Vc12=Vc11*(exp(-T2/(R1*C1)));
Vc2_p2=Vc21*exp(-t2c/(R2*C2));
Vc22=Vc21*(exp(-T2/(R2*C2)));
Vc3_p2=Vc31*exp(-t2c/(R3*C3));
Vc32=Vc31*(exp(-T2/(R3*C3)));
Vc4_p2=Vc41*exp(-t2c/(R4*C4));
Vc42=Vc41*(exp(-T2/(R4*C4)));
Vab_p2=zeros(1,length(t2c));

%definicion de las constantes;
b=R0*C0/At;
s1=R0*C1/(At+C1*R1);
s2=R0*C2/(At+C2*R2);
s3=R0*C3/(At+C3*R3);
s4=R0*C4/(At+C4*R4);
a=(1+b+s1+s2+s3+s4);
g1=(R1*C1)/At;
f1=1+g1;
g2=(R2*C2)/At;
f2=1+g2;
g3=(R3*C3)/At;
f3=1+g3;
g4=(R4*C4)/At;
f4=1+g4;

%proceso iterativo de cálculo;

%inicializacion de los vectores y primer valor
t3=[(T1+T2+At):At:Tfin];
t3c=[0:At:Tfin];

Vab_r=[];
Vc1_r=[];
Vc2_r=[];
Vc3_r=[];
Vc4_r=[];

ifin=(Tfin-T1-T2)/At;

%proceso iterativo
for i=1:1:(ifin-1)
    if i==1
        Vab_r(i)=(1/a)*(0*b+Vc12*s1+Vc22*s2+Vc32*s3+Vc42*s4);
        Vc1_r(i)=(1/f1)*(0+g1*Vc12);
        Vc2_r(i)=(1/f2)*(0+g2*Vc22);
        Vc3_r(i)=(1/f3)*(0+g3*Vc32);
        Vc4_r(i)=(1/f4)*(0+g4*Vc42);
    else

```

```

        Vab_r(i)=(1/a)*(Vab_r(i-1)*b+Vc1_r(i-1)*s1+Vc2_r(i-
1)*s2+Vc3_r(i-1)*s3+Vc4_r(i-1)*s4);
        Vc1_r(i)=(1/f1)*(Vab_r(i)+g1*Vc1_r(i-1));
        Vc2_r(i)=(1/f2)*(Vab_r(i)+g2*Vc2_r(i-1));
        Vc3_r(i)=(1/f3)*(Vab_r(i)+g3*Vc3_r(i-1));
        Vc4_r(i)=(1/f4)*(Vab_r(i)+g4*Vc4_r(i-1));
% nos quedamos que el valor maximo de RVM para el ciclo escogido
        Vmax=[max(Vab_r)];
    end
end

Vab=[Vab_p1, Vab_p2, Vab_r];
Vc1=[Vc1_p1,Vc1_p2,Vc1_r];
Vc2=[Vc2_p1,Vc2_p2, Vc2_r];
Vc3=[Vc3_p1,Vc3_p2, Vc3_r];
Vc4=[Vc4_p1,Vc4_p2, Vc4_r];
t=[t1 t2 t3];

%se representan las funciones

% figure(1);
% subplot(2,1,1);
% plot(t,Vc1,'b');
% legend('Vc1');
% title(strcat('Evolución de la carga de los condensadores'));
% subplot(2,1,2);
% plot(t,Vab,'k');
% legend('Tensión medida VRM');
% title(strcat('Evolución de la Tensión Medida'));
%
% figure(2);
% plot(t3(2:length(t3)),Vab_r,'k');
% legend('Tensión medida VRM en el periodo de descarga');
% title('Evolución de la Tensión Medida VRM en el periodo de
descarga');
resultado=Vab;

end

```

9.4.2 SimularXIV

```

function
[resultado,RVM,Vc1_r,Vab_r]=SimularXIV(Tfin,At,T1,R0,C0,R1,C1,R2,C2,
R3,C3,R4,C4,Vf,z,C5,R5,RVM,C6,R6,C7,R7,C8,R8,C9,R9,C10,R10,C11,R11,C
12,R12,C13,R13,C14,R14)

```

```

%% DESCRIPCIÓN
%funcion para simular la respuesta de circuito RC

```

```

%a partir de los datos de entrada.

%% VARIABLES DE ENTRADA
% -Tini: tiempo inicial de simulacion
% -Tfin: tiempo final de simulacion
% -At: intervalo de tiempo entre dos instantes
% -T1: tiempo de aplicación de tensión
% -T2: tiempo de aplicación de corto
% -R0: resistencia paralelo
% -C0: capacidad paralelo
% -R1: resistencia serie primera rama
% -C1: capacidad serie primera rama
% -R2: resistencia serie segunda rama
% -C2: capacidad serie segunda rama
% -Rn: resistencia serie enesima rama
% -Cn: capacidad serie enesima rama
% -Vf: Tension de fuente aplicada en el ensayo
% -Z:es el número de iteración

%% CUERPO DE LA FUNCIÓN

%por definicion el tiempo de descarga es la mitad que el de carga
T2=T1/2;

%calculo de Vc's para el primer periodo (Vab=Vf)
t1=[0:At:(T1)];
Vc1_p1=Vf*(1-exp(-t1/(R1*C1)));
Vc11=Vf*(1-exp(-T1/(R1*C1)));
Vc2_p1=Vf*(1-exp(-t1/(R2*C2)));
Vc21=Vf*(1-exp(-T1/(R2*C2)));
Vc3_p1=Vf*(1-exp(-t1/(R3*C3)));
Vc31=Vf*(1-exp(-T1/(R3*C3)));
Vc4_p1=Vf*(1-exp(-t1/(R4*C4)));
Vc41=Vf*(1-exp(-T1/(R4*C4)));
Vc5_p1=Vf*(1-exp(-t1/(R5*C5)));
Vc51=Vf*(1-exp(-T1/(R5*C5)));
Vc6_p1=Vf*(1-exp(-t1/(R6*C6)));
Vc61=Vf*(1-exp(-T1/(R6*C6)));
Vc7_p1=Vf*(1-exp(-t1/(R7*C7)));
Vc71=Vf*(1-exp(-T1/(R7*C7)));
Vc8_p1=Vf*(1-exp(-t1/(R8*C8)));
Vc81=Vf*(1-exp(-T1/(R8*C8)));
Vc9_p1=Vf*(1-exp(-t1/(R9*C9)));
Vc91=Vf*(1-exp(-T1/(R9*C9)));
Vc10_p1=Vf*(1-exp(-t1/(R10*C10)));
Vc101=Vf*(1-exp(-T1/(R10*C10)));
Vc11_p1=Vf*(1-exp(-t1/(R11*C11)));
Vc111=Vf*(1-exp(-T1/(R11*C11)));

```

```

Vc12_p1=Vf*(1-exp(-t1/(R12*C12)));
Vc121=Vf*(1-exp(-T1/(R12*C12)));
Vc13_p1=Vf*(1-exp(-t1/(R13*C13)));
Vc131=Vf*(1-exp(-T1/(R13*C13)));
Vc14_p1=Vf*(1-exp(-t1/(R14*C14)));
Vc141=Vf*(1-exp(-T1/(R14*C14)));
Vab_p1=Vf*ones(1,length(t1));

%calculo de Vc's para el segundo periodo (Vab=0)
t2=[(T1+At):At:(T1+T2)];
t2c=[0:At:T2];
Vc1_p2=Vc11*exp(-t2c/(R1*C1));
Vc12=Vc11*(exp(-T2/(R1*C1)));
Vc2_p2=Vc21*exp(-t2c/(R2*C2));
Vc22=Vc21*(exp(-T2/(R2*C2)));
Vc3_p2=Vc31*exp(-t2c/(R3*C3));
Vc32=Vc31*(exp(-T2/(R3*C3)));
Vc4_p2=Vc41*exp(-t2c/(R4*C4));
Vc42=Vc41*(exp(-T2/(R4*C4)));
Vc5_p2=Vc51*exp(-t2c/(R5*C5));
Vc52=Vc51*(exp(-T2/(R5*C5)));
Vc6_p2=Vc61*exp(-t2c/(R6*C6));
Vc62=Vc61*(exp(-T2/(R6*C6)));
Vc7_p2=Vc71*exp(-t2c/(R7*C7));
Vc72=Vc71*(exp(-T2/(R7*C7)));
Vc8_p2=Vc81*exp(-t2c/(R8*C8));
Vc82=Vc81*(exp(-T2/(R8*C8)));
Vc9_p2=Vc91*exp(-t2c/(R9*C9));
Vc92=Vc91*(exp(-T2/(R9*C9)));
Vc10_p2=Vc101*exp(-t2c/(R10*C10));
Vc102=Vc101*(exp(-T2/(R10*C10)));
Vc11_p2=Vc111*exp(-t2c/(R11*C11));
Vc112=Vc111*(exp(-T2/(R11*C11)));
Vc12_p2=Vc121*exp(-t2c/(R12*C12));
Vc122=Vc121*(exp(-T2/(R12*C12)));
Vc13_p2=Vc131*exp(-t2c/(R13*C13));
Vc132=Vc131*(exp(-T2/(R13*C13)));
Vc14_p2=Vc141*exp(-t2c/(R14*C14));
Vc142=Vc141*(exp(-T2/(R14*C14)));
Vab_p2=zeros(1,length(t2c));

%definicion de las constantes;
b=R0*C0/At;
s1=R0*C1/(At+C1*R1);
s2=R0*C2/(At+C2*R2);
s3=R0*C3/(At+C3*R3);
s4=R0*C4/(At+C4*R4);
s5=R0*C5/(At+C5*R5);

```



```

s6=R0*C6/(At+C6*R6);
s7=R0*C7/(At+C7*R7);
s8=R0*C8/(At+C8*R8);
s9=R0*C9/(At+C9*R9);
s10=R0*C10/(At+C10*R10);
s11=R0*C11/(At+C11*R11);
s12=R0*C12/(At+C12*R12);
s13=R0*C13/(At+C13*R13);
s14=R0*C14/(At+C14*R14);
a=(1+b+s1+s2+s3+s4+s5+s6+s7+s8+s9+s10+s11+s12+s13+14);
g1=(R1*C1)/At;
f1=1+g1;
g2=(R2*C2)/At;
f2=1+g2;
g3=(R3*C3)/At;
f3=1+g3;
g4=(R4*C4)/At;
f4=1+g4;
g5=(R5*C5)/At;
f5=1+g5;
g6=(R6*C6)/At;
f6=1+g6;
g7=(R7*C7)/At;
f7=1+g7;
g8=(R8*C8)/At;
f8=1+g8;
g9=(R9*C9)/At;
f9=1+g9;
g10=(R10*C10)/At;
f10=1+g10;
g11=(R11*C11)/At;
f11=1+g11;
g12=(R12*C12)/At;
f12=1+g12;
g13=(R13*C13)/At;
f13=1+g13;
g14=(R14*C14)/At;
f14=1+g14;
%proceso iterativo de cálculo;

%inicializacion de los vectores y primer valor
t3=[(T1+T2+At):At:Tfin];
t3c=[0:At:Tfin];

Vab_r=[];
Vc1_r=[];
Vc2_r=[];
Vc3_r=[];

```

```

Vc4_r=[];
Vc5_r=[];
Vc6_r=[];
Vc7_r=[];
Vc8_r=[];
Vc9_r=[];
Vc10_r=[];
Vc11_r=[];
Vc12_r=[];
Vc13_r=[];
Vc14_r=[];
ifin=(Tfin-T1-T2)/At;

%proceso iterativo
for i=1:1:(ifin-1)
    if i==1

Vab_r(i)=(1/a)*(0*b+Vc12*s1+Vc22*s2+Vc32*s3+Vc42*s4+Vc52*s5+Vc62*s6+
Vc72*s7+Vc82*s8+Vc92*s9+Vc102*s10+Vc112*s11+Vc122*s12+Vc132*s13+Vc14
2*s14);
        Vc1_r(i)=(1/f1)*(0+g1*Vc12);
        Vc2_r(i)=(1/f2)*(0+g2*Vc22);
        Vc3_r(i)=(1/f3)*(0+g3*Vc32);
        Vc4_r(i)=(1/f4)*(0+g4*Vc42);
        Vc5_r(i)=(1/f5)*(0+g5*Vc52);
        Vc6_r(i)=(1/f6)*(0+g6*Vc62);
        Vc7_r(i)=(1/f7)*(0+g7*Vc72);
        Vc8_r(i)=(1/f8)*(0+g8*Vc82);
        Vc9_r(i)=(1/f9)*(0+g9*Vc92);
        Vc10_r(i)=(1/f10)*(0+g10*Vc102);
        Vc11_r(i)=(1/f11)*(0+g11*Vc112);
        Vc12_r(i)=(1/f12)*(0+g12*Vc122);
        Vc13_r(i)=(1/f13)*(0+g13*Vc132);
        Vc14_r(i)=(1/f14)*(0+g14*Vc142);
    else
        Vab_r(i)=(1/a)*(Vab_r(i-1)*b+Vc1_r(i-1)*s1+Vc2_r(i-
1)*s2+Vc3_r(i-1)*s3+Vc4_r(i-1)*s4+Vc5_r(i-1)*s5+Vc6_r(i-
1)*s6+Vc7_r(i-1)*s7+Vc8_r(i-1)*s8+Vc9_r(i-1)*s9+Vc10_r(i-
1)*s10+Vc11_r(i-1)*s11+Vc12_r(i-1)*s12+Vc13_r(i-1)*s13+Vc14_r(i-
1)*s14);
        Vc1_r(i)=(1/f1)*(Vab_r(i)+g1*Vc1_r(i-1));
        Vc2_r(i)=(1/f2)*(Vab_r(i)+g2*Vc2_r(i-1));
        Vc3_r(i)=(1/f3)*(Vab_r(i)+g3*Vc3_r(i-1));
        Vc4_r(i)=(1/f4)*(Vab_r(i)+g4*Vc4_r(i-1));
        Vc5_r(i)=(1/f5)*(Vab_r(i)+g5*Vc5_r(i-1));
        Vc6_r(i)=(1/f6)*(Vab_r(i)+g6*Vc6_r(i-1));
        Vc7_r(i)=(1/f7)*(Vab_r(i)+g7*Vc7_r(i-1));
        Vc8_r(i)=(1/f8)*(Vab_r(i)+g8*Vc8_r(i-1));
    end
end

```

```

Vc9_r(i)=(1/f9)*(Vab_r(i)+g9*Vc9_r(i-1));
Vc10_r(i)=(1/f10)*(Vab_r(i)+g10*Vc10_r(i-1));
Vc11_r(i)=(1/f11)*(Vab_r(i)+g11*Vc11_r(i-1));
Vc12_r(i)=(1/f12)*(Vab_r(i)+g12*Vc12_r(i-1));
Vc13_r(i)=(1/f13)*(Vab_r(i)+g13*Vc13_r(i-1));
Vc14_r(i)=(1/f14)*(Vab_r(i)+g14*Vc14_r(i-1));

end

end
RVM=[max(Vab_r)]
Vab=[Vab_p1, Vab_p2, Vab_r];
Vc1=[Vc1_p1,Vc1_p2,Vc1_r];
Vc2=[Vc2_p1,Vc2_p2, Vc2_r];
Vc3=[Vc3_p1,Vc3_p2, Vc3_r];
Vc4=[Vc4_p1,Vc4_p2, Vc4_r];
Vc5=[Vc5_p1,Vc5_p2, Vc5_r];
Vc6=[Vc6_p1,Vc6_p2, Vc6_r];
Vc7=[Vc7_p1,Vc7_p2, Vc7_r];
Vc8=[Vc8_p1,Vc8_p2, Vc8_r];
Vc9=[Vc9_p1,Vc9_p2, Vc9_r];
Vc10=[Vc10_p1,Vc10_p2, Vc10_r];
Vc11=[Vc11_p1,Vc11_p2, Vc11_r];
Vc12=[Vc12_p1,Vc12_p2, Vc12_r];
Vc13=[Vc13_p1,Vc13_p2, Vc13_r];
Vc14=[Vc14_p1,Vc14_p2, Vc14_r];
t=[t1 t2 t3];

%se representan las funciones

figure(1);
subplot(2,1,1);

plot(t,Vc1,'b',t,Vc2,'r',t,Vc3,'g',t,Vc4,'m',t,Vc5,'y',t,Vc6,'b',t,V
c7,'r',t,Vc8,'g',t,Vc9,'m',t,Vc10,'y',t,Vc11,'b',t,Vc12,'r',t,Vc13,'
g',t,Vc14,'m');

legend('Vc1','Vc2','Vc3','Vc4','Vc5','Vc6','Vc7','Vc8','Vc9','Vc10',
'Vc11','Vc12','Vc13','Vc14');
title(strcat('Evolución de la carga de los condensadores'));
subplot(2,1,2);
plot(t,Vab,'k');
legend('Tensión medida VRM');
title(strcat('Evolución de la Tensión Medida'));

if z==1
figure(2);

```

```

    plot(t3(2:length(t3)),Vab_r,'k');
p1=max(max(Vab_r))
    legend('Tensión medida VRM en el periodo de descarga');
    title('Evolución de la Tensión Medida VRM en el ciclo 1');
resultado=Vab;

end
if z==2
    figure(3);
    plot(t3(2:length(t3)),Vab_r,'k');
    legend('Tensión medida VRM en el periodo de descarga');
    title('Evolución de la Tensión Medida VRM en el ciclo 2');
resultado=Vab;
end
if z==3
    figure(4);
    plot(t3(2:length(t3)),Vab_r,'k');
    legend('Tensión medida VRM en el periodo de descarga');
    title('Evolución de la Tensión Medida VRM en el ciclo 3');
resultado=Vab;
end
if z==4
    figure(5);
    plot(t3(2:length(t3)),Vab_r,'k');
    legend('Tensión medida VRM en el periodo de descarga');
    title('Evolución de la Tensión Medida VRM en el ciclo 4');
resultado=Vab;
end
if z==5
    figure(6);
    plot(t3(2:length(t3)),Vab_r,'k');
    legend('Tensión medida VRM en el periodo de descarga');
    title('Evolución de la Tensión Medida VRM en el ciclo 5');
resultado=Vab;
end
if z==6
    figure(7);
    plot(t3(2:length(t3)),Vab_r,'k');
    legend('Tensión medida VRM en el periodo de descarga');
    title('Evolución de la Tensión Medida VRM en el periodo de descarga');
resultado=Vab;
end
if z==7
    figure(8);
    plot(t3(2:length(t3)),Vab_r,'k');
    legend('Tensión medida VRM en el periodo de descarga');
    title('Evolución de la Tensión Medida VRM en el periodo de descarga');
resultado=Vab;

```

```

end
if z==8
    figure(9);
    plot(t3(2:length(t3)),Vab_r,'k');
    legend('Tensión medida VRM en el periodo de descarga');
    title('Evolución de la Tensión Medida VRM en el periodo de descarga');
    resultado=Vab;
end
if z==9
    figure(10);
    plot(t3(2:length(t3)),Vab_r,'k');
    legend('Tensión medida VRM en el periodo de descarga');
    title('Evolución de la Tensión Medida VRM en el periodo de descarga');
    resultado=Vab;
end
if z==10
    figure(11);
    plot(t3(2:length(t3)),Vab_r,'k');
    legend('Tensión medida VRM en el periodo de descarga');
    title('Evolución de la Tensión Medida VRM en el periodo de descarga');
    resultado=Vab;
end
if z==11
    figure(12);
    plot(t3(2:length(t3)),Vab_r,'k');
    legend('Tensión medida VRM en el periodo de descarga');
    title('Evolución de la Tensión Medida VRM en el periodo de descarga');
    resultado=Vab;
end
if z==12
    figure(13);
    plot(t3(2:length(t3)),Vab_r,'k');
    legend('Tensión medida VRM en el periodo de descarga');
    title('Evolución de la Tensión Medida VRM en el periodo de descarga');
    resultado=Vab;
end
if z==13
    figure(14);
    plot(t3(2:length(t3)),Vab_r,'k');
    legend('Tensión medida VRM en el periodo de descarga');
    title('Evolución de la Tensión Medida VRM en el periodo de descarga');
    resultado=Vab;
end
if z==14
    figure(15);
    plot(t3(2:length(t3)),Vab_r,'k');
    legend('Tensión medida VRM en el periodo de descarga');
    title('Evolución de la Tensión Medida VRM en el periodo de descarga');

```

```
resultado=Vab;  
end  
if z==15  
    figure(16);  
    plot(t3(2:length(t3)),Vab_r,'k');  
    legend('Tensión medida VRM en el periodo de descarga');  
    title('Evolución de la Tensión Medida VRM en el periodo de descarga');  
resultado=Vab;  
end
```

10 Bibliografía

- [1] Y. Bertrand, C. Tran-Duy, V. Murin y A. Schaut, «MV/LV distribution transformers: Research on paper ageing markers,» de *Cigré 2012 Session Papers & Proceedings D1-103*, París, 2012.
- [2] CIGRE Working Group A2D1.46, Field experience with transformer solid insulation ageing markers, Paris: CIGRE, 2019.
- [3] S. Gubanski, P. Boss, G. Csepes and V. Houhanessian, "Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers," *CIGRE Technical Brochure*, no. 254, 2004.
- [4] IEC Standard, IEC 60076-7 Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers, 2018.
- [5] P. Pacheco, M. Cuesto y M. Burgos, «Sizing Step-up Transformers for Solar Generation based on Load Profiles Predictability,» de *6th International Advanced Research Workshop on Transformers (ARWtr)*, Cordoba, 2019.
- [6] J. Lapworth, «Review of Transformer Failures in the UK,» de *artículo C-1 Eurodoble*, Manchester, 2012.
- [7] M. Heathcote, *The J & P Transformer Book*, Oxford: Reed Educational and Professional Publishing Ltd, 1998.
- [8] M. Tshivhlinge, B. Van Jaarveld, L. Ramphole y R. Szewczyk, «Impact of Selected Insulation Materials on Electric Field Stress Distribution in High Voltage Transformer Windings,» de *ARWtr2013*, Baiona– Spain, 2013.
- [9] J.-C. Duart y R. Szewczyk, «Materials & New Technology - With a Special Focus on the Design of Transformers with Alternative Solid and Liquid Insulation Materials,» de *ARWtr2013*, Baiona– Spain, 2013.
- [10] P. Verma, D. Chauhan y Preetinder Singh, «Effects on Tensile Strength of Transformer Insulation Paper under Accelerated Thermal and Electrical Stress,» de *2007 Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Vancouver, BC, Canada, 2007.
- [11] IEC Standard, IEC 60296:2012 Fluids for electrotechnical applications - Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear, 2012.
- [12] IEC Standard, IEC 60422:2013 Mineral insulating oils in electrical equipment - Supervision and maintenance guidance, 2013.
- [13] CIGRE Task Force D1.01.10, «Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers,» *Cigré Brochure*, vol. 323, 2007.
- [14] A. d. Pablo, «Furfural and ageing: How are they related,» de *IEE Colloquium on Insulating Liquids (Ref. No. 1999/119)*, Leatherhead, UK, 1999.
- [15] T. Prevost, D. J. Woodcock y C. Krause, «The effects on winding clamping pressure due to changes in moisture, temperature and insulation age,» *Weidman*, 2000.
- [16] C. Krause, W. Goetz y H. Bernhard, «The Change of the Clamping Pressure in Transformer Windings due to Variation of the Moisture Content - Tests with

- pressboard spacer stacks,» de *CIGRE SC 12 Transformers / Workshop on Short Circuit Performance of Transformers*, Budapest, 1999.
- [17] C. Krause, W. Goetz y B. Heinrich, «The Impact of Drying and Oil Impregnation Conditions and of Temperature Cycles on the Clamping Force of Power Transformer Windings,» de *2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Boston, MA, 2002.
- [18] MICAFLUID, «VOPM03 Product data sheet,» <https://www.micafluid.ch/english/VOPM03.htm>, 2019.
- [19] L. Shaoyu, M. Jixian y G. Jiayang, «Practical application of on-site vapour phase drying technique on power transformers,» de *Cigré 2012 Session Papers & Proceedings A2-206*, París, 2012.
- [20] S. Zabeschek y H. Strzala, «Drying of high voltage power transformers in the field with a mobile vapour phase drying equipment,» Hendrich vacuum systems, Ehringshausen, Alemania, 2007.
- [21] NYNAS, Transformer oils: functions and general requirements, NYNAS South Africa Pty Ltd, 2010.
- [22] V. Ryzhenko y V. Sokolov, Effect of Moisture on Dielectric Withstand Strength of Winding Insulations in Power Transformers, 1981.
- [23] OMICRON, CPC 100 Sistema multifuncional de pruebas primarias para la puesta en servicio y el mantenimiento de subestaciones, Mayo 2019.
- [24] Z. T. Yao y T. K. Saha, «Analysis and Modeling of Dielectric Responses of Power Transformer Insulation,» de *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Chicago, IL, USA, USA, July 2002.
- [25] S. Qin, D. Zhang, G. Ding, T. Zhu y Y. Li, «Study on Return Voltage Measurement of Oil-paper Insulation Testing Technology in Transformers,» de *19th IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, Manchester, 2017.
- [26] U. Gäfvert, P. Ghasemi, L. Matz y B. Jönsson, «Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain Applied to Diagnostics of Power Transformers,» de *6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Xi'an, 2000.
- [27] M. Anglhuber, Application Note: Dielectric Analysis of High Voltage Power Transformers, Omicron, 2017.
- [28] G. Csepes, I. Hamos, R. Brooks y V. Karius, «Practical foundations of RVM (Return Voltage Method for Oil/Paper insulation diagnosis),» de *1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Atlanta, 1998.
- [29] UNITRONICS, UM2B (Medidor de tensión de reabsorción) Manual de usuario V3 (5ª Edición), Junio 2008.
- [30] Z. Tao y Y. Wen-yan, «Modelling and Calculation for Dielectric Response Circuit of Oil-Paper Insulation Transformers,» de *2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering*, Wuhan, China, 2011.
- [31] J. C. Duplessis, Electrical Field Tests for the Life Management, OMICRON electronics Corp USA, 2013.

- [32] J. Abella Martin y J. Martínez Duart, Física de dieléctricos, Barcelona: MARCOMBO, 1984.
- [33] T. Martín Blas y A. Serrano Fernandez, EUIT Forestal - Universidad Politécnica de Madrid, 2020. [En línea]. Available: <http://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/electro/conductores.html>. [Último acceso: 2020].
- [34] D. F.-G. I. U. Božidar Filipovic-Grcic, «Modeling of Polarization in Oil-Paper Insulation Using Recovery Voltage Measurements,» *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, vol. 6, nº 1, January-February 2011.
- [35] R. Patsch, «Dielectric Time Constants – the Key to the Interpretation of Return Voltage Measurements on Cellulose-Oil Insulated Power Equipment,» de *Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS*, 2010.
- [36] A. K. Jonscher, Dielectric relaxation in solids, Londres: Chelsea Dielectrics Press, 1983.
- [37] Z. Kong Shuang, Front Application of Chemistry -Dielectric Spectrum Method and Application, Chemical Industry Press, 2012.
- [38] R. Coelho, Physics of Dielectrics for the Engineer, Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
- [39] G. Csepes, «Practical foundations of RVM (Return Voltage Method for Oil/Paper insulation diagnosis),» de *0-7803-5035-9/98/ 1998IEEE*, 1998.
- [40] T. Saha, P. Purkait y F. Muller, «Deriving an Equivalent Circuit of Transformers Insulation for Understanding the Dielectric Response Measurements,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 20, nº 1, 2005.
- [41] M. Zink, Zustandsbewertung betriebsgealterter Hochspannungstransformatordurchführungen mit Öl-Papier-Dielektrikum mittels dielektrischer Diagnose, Ilmenau: Universitätsverlag Ilmenau, 2013.
- [42] G. Frimpong, U. Gafvert y J. Fuhr, «Measurement and modeling of dielectric response of composite oil/paper insulation,» *Proc. 5th Int. Conf. Properties and Applications of Dielectric Materials*, vol. 1, p. 86–89, 1997.
- [43] CIGRE Task Force 15.01.09., «Dielectric Response Methods for Diagnosis of Power Transformers,» *Electra*, nº 202, 2002.
- [44] R. Liao, J. Hao, G. Chen y L. Yang, «Quantitative analysis of ageing condition of oil-paper insulation by frequency domain spectroscopy,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, nº 3, 2012.
- [45] R. Liao, J. Liu, L. Yang, K. Wang, J. Hao, Z. Ma, J. Gao y Y. Lv, «Quantitative analysis of insulation condition of oil-paper insulation based on frequency domain spectroscopy,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, nº 1, 2015.
- [46] G. K. Supramaniam, Z. F. Hussien y M. A. T, «Application of Frequency Domain Spectroscopy (FDS) in assessing dryness and ageing state of transformer insulation systems,» de *2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference*, Johor Bahru, Malaysia, 2008.
- [47] T. Zhang, X. Q. Li, Q. Zuo, B. Zhang y Y. Q. Liu, «Parameter estimation of dielectric response circuit using improved mathematical model,» de *2015 IEEE*

- International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*, Shanghai, China, 2015.
- [48] S. Ojha, P. Purkait y S. Chakravorti, «Cole-Cole Representation of Transformer Oil-Paper Insulation Dielectric Response,» de *3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems*, Punjab, 2017.
- [49] S. Kasap, Principles of electronic materials and devices, Boston: McGraw-Hill, 2006.
- [50] IEC Standard, IEC 60475:2011 Method of sampling insulating liquids, 2011.
- [51] CIGRE Task Force D1.01.09, Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers, Paris: CIGRÉ, 2002.